



Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Azcapotzalco

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
POSGRADO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

**EDIFICIOS ESTRUCTURADOS CON LOSAS DE
TRANSFERENCIA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

P R E S E N T A

DANIEL ALEXANDER MANZANARES PONCE

TUTOR:
DR. ALONSO GÓMEZ BERNAL

MÉXICO, D. F.

ABRIL, 2013

A mi esposa:

Flor Álvarez Medina

A mis padres

Reyna Ponce Ortiz y Francisco Manzanares Gálvez

A mis segundos padres:

Georgina Ponce Ortiz y Gerardo Salinas Castro

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a que todas aquellas personas e instituciones que contribuyeron a la elaboración y culminación satisfactoria del presente trabajo.

Agradecimiento especial a mí asesor de tesis Dr. Alonso Gómez Bernal, por su acertada guía e innumerables aportaciones a este trabajo.

A todos los profesores del posgrado, que con sus enseñanzas han abierto un amplio panorama de conocimientos que sin duda serán de gran utilidad el resto de mi existencia.

Al Dr. Juan de León Casillas García y el Dr. Oscar López Bátiz, por el tiempo dedicado y sus valiosas contribuciones a esta tesis.

A la coordinación del posgrado, en un inicio dirigida por el Dr. Manuel Ruiz Sandoval y posteriormente por el Dr. Arturo Tena Colunga por su gran apoyo.

A la Universidad Autónoma Metropolitana campus Azcapotzalco y a CONACYT, esta última por haber otorgado la beca que hizo posible la culminación de estos estudios.

A todas aquellas personas que directa o indirectamente colaboraron para coronar con éxito este trabajo.

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE	I
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS	XI
CONTENIDO SINTETIZADO	XIII
 INTRODUCCIÓN	 1
 CAPITULO 1 ANTECEDENTES	 3
1.1 Introducción	3
1.2 Un Estudio de Observancia del Reglamento de Construcciones	3
1.3 Losas de Transferencia	4
1.4 Trabajos Relacionados con el Estudio de Losas	8
1.4.1 Investigaciones Analíticas	8
1.4.1.1 Trabajo de Woodring y Siess (1963)	8
1.4.1.2 Trabajo de Andreasen y Nielsen (1986)	10
1.4.1.3 Trabajo de Kennedy y Goodchild (2003)	11
1.4.1.3 Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTCC-2004)	13
1.4.2 Investigaciones Experimentales	13
1.4.2.1 Pruebas Realizadas en la Universidad Técnica de Berlín (1963)	14
1.4.2.2 Trabajo de Vecchio y Tang (1990)	14
1.4.2.3 Trabajo de Hopkins y Park (1971)	16
1.5 Objetivos de la Tesis	18
1.5.1 Objetivo General	18
1.5.1 Objetivos Específicos	18
1.6 Discusión	18
 CAPITULO 2 EDIFICIOS CONSTRUIDOS CON SISTEMAS DE PISO DE TRANSFERENCIA	 20
2.1 Introducción	20
2.2 Análisis de los Edificios Reales	20
2.2.1 Edificio A	20
2.2.1.1 Características de la Planta del Primer nivel	21
2.2.1.2 Análisis de Cortantes en Edificio A	22
2.2.1.3 Cortantes Máximos Permisibles	25

2.2.2 Edificio B	26
2.2.2.1 Análisis del Edificio B	27
2.3 Discusión	29
 CAPITULO 3 ANÁLISIS PARAMÉTRICO PARA LA EVALUACIÓN DE CORTANTES EN MUROS SOBRE PISO DE TRANSFERENCIA	 31
3.1 Introducción	31
3.2 Alcance de la Evaluación Paramétrica	31
3.3 Parámetros Considerados en el Análisis	32
3.4 Características de los Modelos de Edificios con losa de Transferencia	33
3.4.1 Planta de Distribución de Muros Propuesta	33
3.4.2 Materiales	35
3.4.3 Identificación de los Modelos Evaluados	36
3.4.4 Dimensiones de los Elementos Estructurales	36
3.4.5 Cargas Aplicadas a los Modelos	37
3.5 Cortantes en los Muros Estudiados	38
3.5.1 Resistencia al Cortante de los Muros Analizados	39
3.5.2 Edificios Sobre base Rígida	39
3.5.3 Edificios con Losa de Transferencia	40
3.6 Comparación General Edificios sobre Base Rígida y Edificios con Losa de Transferencia	42
3.7 Discusión	44
 CAPITULO 4 PROPIEDADES DE LOS MODELOS ANALIZADOS CON ELEMENTOS FINITOS	 45
4.1 Introducción	45
4.2 Alcance del Modelado Analítico con Elementos Finitos	45
4.3 Procedimiento de Elaboración de los Modelos	47
4.4 Identificación de los Modelos Estudiados	49
4.4.1 Modelos de Muros de Muros sobre Base Rígida	50
4.5 Propiedades de los Modelos Realizados en ANSYS	50
4.5.1 Materiales	51
4.5.2 Geometría de los Modelos	51
4.5.3 Acero de Refuerzo en Losa, Castillos y Dalas	52
4.5.4 Mallado de los Modelos	53
4.5.5 Generación de los Modelos en ANSYS	53
4.5.5.1 Tipos de Elementos Seleccionados	54
4.5.5.2 Propiedades No Lineales Asignadas a los Modelos	57
4.5.5.3 Cargas y Restricciones de Apoyo de los Modelos	58
4.6 Discusión	58

CAPITULO 5 ANÁLISIS NO LINEAL CON ELEMENTOS FINITOS DE MODELOS	
LOSA-MURO ANTE CARGA VERTICAL	61
5.1 Introducción	61
5.2 Puntos de Monitoreo de Desplazamiento	61
5.3 Losa Cuadrada con Carga Uniformemente Distribuida	63
5.3.1 Curva de Capacidad de la losa Cargada Uniformemente	63
5.4 Modelos de Losas Cuadradas Cargadas con Muros de Carga (Análisis por Desplazamientos, Carga Vertical)	65
5.4.1 Modelos M1_C2.5_12V y M2_M2.5_12V	65
5.4.2 Modelos M3_C3_12V y M4_M3_12V	69
5.4.3 Modelos M5_C3.75_12V y M6_M3.75_12V	72
5.4.4 Modelos M7_C3_13V y M8_M3_13V	75
5.5 Modelos de Losas Cuadradas Cargadas con Muros de Carga (Análisis por Esfuerzos)	78
5.5.1 Puntos de Monitoreo de esfuerzos	79
5.5.2 Modelo M2_M2.5_12V	79
5.5.3 Modelo M4_M3_12V	82
5.6 Comparación de las curvas de capacidad de los Modelos Analizados Bajo Carga Vertical	84
5.7 Revisión de Agrietamientos	86
5.7.1 Agrietamientos en losa	87
5.7.2 Agrietamientos en muro	92
5.8 Discusión	94
 CAPITULO 6 ANÁLISIS NO LINEAL CON ELEMENTOS FINITOS DE LOS	
MODELOS SOMETIDOS CARGA VERTICAL Y CARGA LATERAL	96
6.1 Introducción	96
6.2 Características de los Modelos Analizados	96
6.3 Puntos de Monitoreo de Desplazamiento	98
6.4 Modelos de Losas Cuadradas Cargadas con Muros de Carga (Análisis por Desplazamientos, Carga Combinada)	99
6.4.1 Modelos M9_C2.5_12VL y M10_M2.5_12V	99
6.4.2 Modelos M11_C3_12VL y M12_M3_12VL	101
6.4.3 Modelos M13_C3.75_12VL y M14_M3.75_12VL	104
6.4.4 Modelos M15_C3_13VL y M16_M3_13VL	105
6.5 Comparación de las Curvas de Capacidad de los Modelos No Lineales bajo carga Combinada	108
6.6 Muros sobre Base Rígida	111
6.6.1 Resultados Esperados de Resistencia a Cortante de los Muros de Mampostería Sobre Base Rígida	115
6.7 Comparación del Comportamiento ante Carga Lateral del Sistema Muro-Losa y Muros Sobre Base Rígida	116
6.7.1 Sistema con Muro de Concreto	116
6.7.2 Sistema con Muro de Mampostería	121
6.8 Análisis de Rigideces Iniciales	124

6.9 estados Limites de los Modelos Muro-Losa Analizados	128
6.9.1 Curvas de Capacidad Normalizadas	128
6.9.2 Estados Límites Propuestos	129
6.9 Discusión	132

CAPITULO 7 DISEÑO DEL PROYECTO EXPERIMENTAL 134

7.1 Introducción	134
7.2 Alcance del Proyecto Analítico	134
7.3 Criterios de Diseño del Espécimen de Prueba	135
7.3.1 Propiedades de Los materiales	135
7.3.2 Dimensionamiento del Espécimen de Prueba	136
7.3.3 Condiciones de Apoyo del Espécimen	138
7.3.4 Condiciones de Carga del Espécimen	138
7.4 Diseño del Espécimen	139
7.4.1 Diseño y Revisión del Muro de Mampostería Confinada Reforzada	139
7.4.1.1 Dimensiones del Muro	139
7.4.1.2 Carga Vertical de Diseño	139
7.4.1.3 Refuerzo Horizontal del Muro, Castillos y Dala	139
7.4.1.4 Acero de Refuerzo de la Losa de Prueba	140
7.4.1.5 Revisión del Muro de Mampostería	140
7.4.1.5.1 Revisión por Cargas Verticales	140
7.4.1.5.2 Revisión por Distorsión	142
7.4.1.5.3 Resistencia por Cortante	143
7.4.2 Carga Vertical Ultima	144
7.4.3 Diseño de Las Trabes de Apoyo	145
7.4.4 Dispositivo de Carga Vertical	150
7.4.5 Dispositivo de Carga Horizontal	151
7.5 Instrumentación del Espécimen de Prueba	152
7.5.1 Strain Gages	153
7.5.2 Micrómetros	154
7.6 Protocolo de Carga	156
7.7 Discusión	157

CAPITULO 8 COEFICIENTES DE MOMENTO PARA LOSA CUADRADA CON MURO DE CARGA EL CENTRO DEL CLARO 158

8.1 Introducción	158
8.2 Puntos Analizados	159
8.3 Integral de Momento	159
8.4 Coeficientes de Momento	160
8.5 Discusión	165

APÉNDICE A	Propiedades de la Mampostería, Concreto y Acero de Refuerzo Utilizadas para El Diseño y Construcción del Espécimen de Prueba	172
A.1	Introducción	172
A.2	Mampostería	172
A.3	Concreto	173
A.4	Acero	176
APÉNDICE B	Análisis de Rigidez a Flexión del Sistema Muro-Losa	179
B.1	Introducción	179
B.2	Análisis de Rigideces	179
APÉNDICE C	Estados Limites Modelos Muro Losa	185
C.1	Introducción	185
C.2	Modelo M12_M3_12VL	185
C.3	Modelo M11_C3_12VL	187
C.4	Discusión	189
APÉNDICE D	Modelos Sometidos a Cargas Cíclicas	190
D.1	Introducción	190

ÍNDICE DE FIGURAS

Pagina

Capítulo 1

Figura 1.1 Configuración típica de sistemas con Losas de Transferencia	5
Figura 1.2 Edificio A, con losa de transferencia reticular o plana.....	6
Figura 1.3 Edificio con sistema de piso de transferencia formado por losa maciza y vigas secundarias	7
Figura 1.4 Edificio con losa de transferencia y con sistema vigueta y bovedilla en pisos superiores.....	7
Figura 1.5 Edificio con losa de transferencia de “Losacero” y marcos de acero.....	8
Figura 1.6 Losa rectangular empotrada en todos sus bordes y cargada uniformemente.....	10
Figura 1.7 Curvas de capacidad de carga en función de la deflexión relativa en losas rectangulares con bordes empotrados	11
Figura 1.8 Losa rectangular empotrada en todos sus bordes y cargada uniformemente	11
Figura 1.9 Izq.) Agrietamiento ultimo para una de las losas probadas uniformemente Cargada y simplemente apoyada en todos sus bordes, Der.) Curva de Capacidad de una de las losas probadas.....	14
Figura 1.10 Vista general de los especímenes de losa de banda, a) configuración de la losa de banda, b) condiciones de carga y apoyo.....	15
Figura 1.11 Configuración del espécimen de prueba	16
Figura 1.12 Izq.) Grafico carga - deformación de los especímenes probados, b) Patrón de agrietamiento modelo TV2.....	16
Figura 1.13 Izq.) Patrón de agrietamiento para piso de losa y viga a 21.5 KN/m ² , Der.) Superficie no cargada después de la prueba.....	17

Capítulo 2

Figura 2.1 Edificio A.....	21
Figura 2.2 Izq.) Distribución de muros sobre losa de transferencia, Der) Piso de Transferencia.....	22
Figura 2.3 a) Distribución de muros sobre losa de transferencia, b) Piso de Transferencia.....	27
Figura 2.4 Edificio B.....	28

Capítulo 3

Figura 3.1 Parámetros considerados y modelos realizados.....	33
Figura 3.2 Plantas superpuestas de losa de transferencia y planta de distribución de muros. Claros de 4 mts. (Izq.), Claro de 8 mts. (Der.).....	34
Figura 3.3 Vista del modelo de 5 niveles de losa de transferencia (Izq.), y sobre base rígida (Der.).....	34
Figura 3.4 Muros analizados en los análisis.....	35

Capítulo 4

Figura 4.1 Esquema principal de los modelos de losa de transferencia realizados.....	46
Figura 4.2 Esquema de la metodología aplicada.....	47

Figura 4.3 Dimensionamiento y condiciones de los modelos Realizados en ANSYS.....	52
Figura 4.4 Vista en planta de los modelos a realizar variando L y espesor de la losa.....	52
Figura 4.5 Ensamble de mallado para el acero de refuerzo a) Losa, b) Losa-castillo c) Losa – castillos –dala.....	54
Figura 4.6. Ensamble de mallado de los elementos de concreto a) Losa b) Losa-muro c) Losa-muro-castillos-dala.....	54
Figura 4.7 Elemento LINK8.....	55
Figura 4.8 Elemento Solido <i>SOLID65</i>	56
Figura 4.9 a) Modelo Bilineal Isotrópico del Acero b) Criterio de falla	57
Figura 4.10. a) Esfuerzo en condición agrietada b) Esquema Superficie de falla en el espacio del esfuerzo principal	59
Figura 4.11 Modelo con losa superior utilizado para el análisis ante carga lateral.....	60

Capítulo 5

Figura 5.1 Localización de los puntos de monitoreo de desplazamientos verticales.....	62
Figura 5.2 Curva de capacidad, presión vs. desplazamiento vertical al centro del claro modelo LCU_12.....	64
Figura 5.3 Curva de capacidad: carga equivalente vs. desplazamiento vertical al centro del claro de la losa, modelo LCU_12.....	64
Figura 5.4 Grafico Carga Vs. Desplazamiento modelo M1_C2.5_12V.....	66
Figura 5.5 Grafico Carga Vs. Desplazamiento modelo M2_M2.5_12V	67
Figura 5.6 Contorno de deformaciones verticales: a) M1_C2.5_12V b) M2_M2.5_12V.....	67
Figura 5.7 Comparación curva de capacidad modelos M1_C2.5_12V y M2_M2.5_12V.....	68
Figura 5.8 Comparación curva de capacidad modelos M1_C2.5_12V, M2_M2.5_12V y LCU_12.....	69
Figura 5.9 Grafico Carga Vs. Desplazamiento modelo M3_C3_12V.....	70
Figura 5.10 Grafico Carga Vs. Desplazamiento modelo M4_M3_12V.....	70
Figura 5.11 Comparación curva de capacidad modelos M3_C3_12V y M4_M3_12V.....	71
Figura 5.12 Comparación curva de capacidad modelos M3_C3_12V, M4_M3_12V y LCU_12.....	72
Figura 5.13 Grafico Carga Vs. Desplazamiento modelo M5_C3.75_12V.....	73
Figura 5.14 Grafico Carga Vs. Desplazamiento modelo M6_M3.75_12V.....	73
Figura 5.15 Comparación de Curvas de capacidad Modelos M5_C3.75_12V y M6_M3.75_12V.....	74
Figura 5.16 Grafico Carga Vs. Desplazamiento modelo M7_C3_13V.....	75
Figura 5.17 Grafico Carga Vs. Desplazamiento modelo M8_M3_13V.....	76
Figura 5.18 Comparación de Curvas de capacidad Modelos M7_C3_13V y M8_M3_13V.....	76
Figura 5.19 Comparación de Curvas de capacidad Modelos M7_C3_13V, M8_M3_13V y LCU_12.....	77
Figura 5.20 Puntos de monitoreo de esfuerzos a) en la losa b) en el muro.....	79
Figura 5.21 Grafico Carga Vertical Vs. Esfuerzos en la losa modelo M2_M2.5_12V.....	80
Figura 5.22 Grafico Carga Vertical Vs. Esfuerzos en el muro modelo M2_M2.5_12V.....	81
Figura 5.23 Grafico Carga Vertical Vs. Esfuerzos en la losa modelo M4_M3_12V.....	82
Figura 5.24 Grafico Carga Vertical Vs. Esfuerzos en el muro modelo M4_M3_12V.....	83
Figura 5.25 Deformadas de la losa a) Uniformemente Cargada b) Cargada a través de un muro.....	83
Figura 5.26 Curvas de capacidad de los modelos con muro de concreto.....	84
Figura 5.27 Curvas de capacidad de los modelos con muro de mampostería	86
Figura 5.28 Comparación de las curvas de capacidad de todos los modelos	86
Figura 5.29 Patrón de agrietamiento en la losa LCU_12, cara superior (Izq.), cara inferior (Der.).....	87
Figura 5.30 Patrón de agrietamiento en la losa M1_C2.5_12V, cara superior (Izq.),	

cara inferior (Der.).....	88
Figura 5.31 Patrón de agrietamiento en la losa M2_M2.5_12V, cara superior (Izq.), cara inferior (Der.).....	88
Figura 5.32 Patrón de agrietamiento en la losa M3_C3_12V, cara superior (Izq.), cara inferior (Der.).....	89
Figura 5.33 Patrón de agrietamiento en la losa M4_M3_12V, cara superior (Izq.), cara inferior (Der.).....	89
Figura 5.34 Patrón de agrietamiento en la losa M5_C3.75_12V, cara superior (Izq.), cara inferior (Der.).....	90
Figura 5.35 Patrón de agrietamiento en la losa M6_M3.75_12V, cara superior (Izq.), cara inferior (Der.).....	90
Figura 5.36 Patrón de agrietamiento en la losa M7_C3_13V, cara superior (Izq.), cara inferior (Der.).....	91
Figura 5.37 Patrón de agrietamiento en la losa M8_M3_13V, cara superior (Izq.), cara inferior (Der.).....	91
Figura 5.38 Agrietamiento en el muro M1_C2.5_12V (Izq.), M2_M2.5_12V (Der.).....	92
Figura 5.39 Agrietamiento en el muro M3_C3_12V (Izq.), M4_M3_12V (Der.).....	93
Figura 5.40 Agrietamiento en el muro M5_C3.75_12V (Izq.), M6_M3.75_12V (Der.).....	93
Figura 5.41 Agrietamiento en el muro M7_C3_13V (Izq.), M8_M3_13V (Der.).....	94

Capítulo 6

Figura 6.1 Esquema de los modelos analizados bajo carga combinada.....	97
Figura 6.2 Puntos de monitoreo de desplazamiento.....	99
Figura 6.3 Carga lateral Vs. Desplazamiento lateral/distorsión lateral	100
Figura 6.4 Carga lateral Vs. Desplazamiento vertical modelos M9_C2.5_12VL y M10_M2.5_12VL	101
Figura 6.5 Carga lateral Vs. Desplazamiento lateral/distorsión lateral M11_C3_12VL	102
Figura 6.6 Carga lateral Vs. Desplazamiento vertical modelos M11_C3_12VL y M12_M3_12VL.....	103
Figura 6.7 Carga lateral Vs. distorsión lateral	104
Figura 6.8 Carga lateral Vs. distorsión lateral	105
Figura 6.9 Carga lateral Vs. Desplazamiento vertical modelos M15_C3_13VL y M16_M3_13VL.....	106
Figura 6.10 Estados de Deformación Lateral a) Al final de la aplicación de la carga vertical b) Al final de la aplicación de la carga lateral.....	107
Figura 6.11 Comparación de distorsión lateral de los modelos con muro de concreto.....	108
Figura 6.12 Comparación de distorsión lateral de los modelos con muro de mampostería.....	109
Figura 6.13 Comparación de distorsión lateral todos los modelos sometidos a carga combinada.....	110
Figura 6.14 Esquema de geometría y carga de los modelos de muro sobre base rígida.....	112
Figura 6.15 Carga lateral Vs. distorsión lateral	113
Figura 6.16 Carga lateral Vs. distorsión lateral	113
Figura 6.17 Carga lateral Vs. distorsión lateral	115
Figura 6.18 a) Carga lateral Vs. distorsión lateral M9_C2.5_12VL y MBR_C2.5, b) Agrietamiento M9_C2.5_12VL, c) Agrietamiento MBR_C2.5	118
Figura 6.19 a) Carga lateral Vs. distorsión lateral M11_C3_12VL, M15_C3_13VL y MBR_C3, b) Agrietamiento M11_C3_12VL, c) Agrietamiento MBR_C3.....	119
Figura 6.20 a) Carga lateral Vs. distorsión lateral M13_C3.75_12VL y MBR_C3.75 b) Agrietamiento M13_C3.75_12VL, c) Agrietamiento MBR_C3.75.....	120

Figura 6.21	Patrón de agrietamiento provocado por el puntal de compresión ejercido por el muro, Modelo M11_C3_12VL 120.....	120
Figura 6.22	a) Carga lateral Vs. distorsión lateral M10_M2.5_12VL y MBR_MBR_M2.5 b) Agrietamiento M10_M2.5_12VL c) Agrietamiento MBR_M2.5.....	121
Figura 6.23	a) Carga lateral Vs. distorsión lateral M12_M3_12VL, M16_M3_13VL y MBR_M3 b) Agrietamiento M12_M3_12VL, c) Agrietamiento MBR_M3 122.....	122
Figura 6.24	a) Carga lateral Vs. distorsión lateral M14_M3.75_12VL y MBR_M3.75 b) Agrietamiento M14_M3.75_12VL, c) Agrietamiento MBR_M3.75	124
Figura 6.25	Modelo Trilineal para cargas Monótonas en muros de mampostería (Alcocer y Flores, 2001) 124.....	124
Figura 6.26	Idealización de las condiciones de borde.....	126
Figura 6.27	Curvas de Capacidad Normalizadas para modelos losa-muro con muro de mampostería...	129
Figura 6.28	Curvas de Capacidad Normalizadas para modelos losa-muro con muro de concreto.....	129
Figura 6.29	Estados límites para modelos muro-losa con muro de mampostería	130
Figura 6.30	Estados límites para modelos muro-losa con muro de concreto	131

Capítulo 7

Figura 7.1	Dibujo en 3D del espécimen de prueba	137
Figura 7.2	Vista superior y corte transversal del modelo de prueba	137
Figura 7.3	Vista lateral del espécimen.....	138
Figura 7.4	Detalle de armado de refuerzo de la losa de prueba	141
Figura 7.5	Ubicación de las trabes de apoyo en el espécimen de prueba	146
Figura 7.6	Dimensiones de trabe de apoyo acartelada	147
Figura 7.7	Detalles de trabes de apoyo	149
Figura 7.8	Detalles de trabes de apoyo en corte.....	149
Figura 7.9	Avances en la construcción del espécimen de prueba	150
Figura 7.10	Parte de los dispositivos ya construidos para la aplicación de carga vertical a) Trabe longitudinal. B) trabes transversales, c) Dispositivo de anclaje del Cold Rolled.....	151
Figura 7.11	Detalle de dispositivo de carga lateral a) Vista superior b) Vista lateral	152
Figura 7.12	Instrumentación losa de prueba a) Lecho inferior b) Lecho superior.....	153
Figura 7.13	Instrumentación con strain gages de los castillos y su anclaje.....	154
Figura 7.14	Micrómetros en losa y trabes de apoyo	154
Figura 7.15	Micrómetros en muro de carga	155
Figura 7.16	Protocolo de Carga Lateral	156

Capítulo 8

Figura 8.1	Puntos fijados para la obtención de los coeficientes de momento	158
Figura 8.2	Ecuaciones de esfuerzos punto 1, modelo M3_C3_12V.....	160

Apéndice A

Figura A.1	Prueba de resistencia del acero de refuerzo	176
Figura A.2	Gráficos de Esfuerzo - Deformación para probetas de barras No.3	177
Figura A.2	Gráficos de Esfuerzo - Deformación para probetas de barras No.3.....	177

Apéndice B

Figura B.1 Grafico que relación n y R, para Muro de mampostería.....	181
Figura B.2 Gráfico que relación L y R, para muro de mampostería	182
Figura B.3 Gráfico que relación n y R, para muro de concreto	182
Figura B.4 Gráfico que relación L y R, para muro de mampostería	183
Figura B.5 Gráfico que relación m y R, para muro de mampostería	183

Apéndice C

Figura C.1 Estados limites modelos muro-losa (muro de mampostería)	186
Figura C.2 Estados limites modelos muro-losa (muro de concreto)	188

Apéndice D

Figura D.1 Protocolos de Carga Utilizados	191
Figura D.2 Historial de carga y distorsiones laterales de los modelos analizados.....	191
Figura D.3 Primer ciclo de carga	192
Figura D.4 Segundo ciclo de carga	193
Figura D.5 Tercer ciclo de carga	193
Figura D.6 Cuarto ciclo de carga 193.....	193
Figura D.7 Quinto ciclo de carga 194.....	194
Figura D.8 Sexto ciclo de carga 194.....	194
Figura D.9 Estado Final de Agrietamiento Modelo MBR_M2.5CIC	194

ÍNDICE DE TABLAS

Pagina

Capítulo 1

Tabla 1.1 Formulacion para losas con cargas lineales empotradas en los cuatro bordes 12

Tabla 1.2 Factores para considerar las cargas lineales como cargas uniformes equivalentes..... 13

Capítulo 2

Tabla 2.1 Cortantes Edificio A, LT* versus BR*, en la dirección corta..... 23

Tabla 2.2 Cortantes Edificio A, LT* versus BR*, en la dirección larga..... 24

Capítulo 3

Tabla 3.1 Identificación de los modelos..... 36

Tabla 3.2 Resistencia cortante teórica y cortantes en el modelos de BR_5..... 39

Tabla 3.3 Resistencia cortante teórica y cortantes en el modelos de BR_7..... 39

Tabla 3.4 Cortante en los muros sobre base rígida, para carga gravitacional y lateral..... 40

Tabla 3.5 Cortantes en los muros para claros de losa de 4 metros..... 40

Tabla 3.6 Cortantes en los muros para claros de losa de 8 metros..... 41

Tabla 3.7 Comparación Cortantes Muro M1..... 42

Tabla 3.8 Comparación Cortantes Muro M2..... 43

Tabla 3.9 Comparación Cortantes Muro M3..... 43

Capítulo 4

Tabla 4.1 Modelos de losa de transferencia realizados..... 49

Tabla 4.2 Modelos de muros sobre base rígida realizados..... 50

Capítulo 5

Tabla 5.1 Tabla resumen de los modelos bajo carga vertical..... 78

Capítulo 6

Tabla 6.1 Tabla resumen de los modelos bajo carga combinada..... 110

Tabla 6.2 Predicción de la resistencia de los modelos con muro de mampostería sobre base rígida 116

Tabla 6.3 Comparación de rigidez inicial teórica con la obtenida en los modelos de E.F.
para base rígida 126

Tabla 6.4 Comparación de rigidez inicial teórica con la obtenida en los modelos de E.F.
para sistema muro-losa 127

Tabla 6.5 Estados límites para modelos muro-losa con muro de mampostería 131

Tabla 6.6 Estados límites para modelos muro-losa con muro de concreto	131
------------------------------------------------------------------------------------	-----

Capítulo 7

Tabla 7.1 Propiedades del Muro	143
Tabla 7.2 Propiedades equivalentes de la columna ancha.....	143
Tabla 7.3 Rotación y distorsión para una carga lateral de 4.80 ton	143
Tabla 7.4 Datos para el cálculo de las trabes acarteladas.....	148
Tabla 7.5 Resultados obtenidos para el diseño de las trabes acarteladas.....	148
Tabla 7.6 Identificación de los canales de instrumentación.....	156

Capítulo 8

Tabla 8.1 Esfuerzos y momentos para modelo LCU_12.....	162
Tabla 8.2 Esfuerzos y momentos para modelo M1_C2.5_12V, a/L=1.50	162
Tabla 8.3 Esfuerzos y momentos para modelo M2_M2.5_12V, a/L=1.50.....	163
Tabla 8.4 Esfuerzos y momentos para modelo M3_C3_12V, a/L=1.25 163.....	163
Tabla 8.5 Esfuerzos y momentos para modelo M4_M3_12V, a/L=1.25 164.....	164
Tabla 8.6 Coeficientes de Momento.....	164

Apéndice A

Tabla A.1 Datos para el Diseño de Mezcla de Concreto.....	173
Tabla A.2 Dependencia entre la relación Agua-Cemento y la resistencia a la compresión del concreto.....	174
Tabla A.3 Requisitos aproximados de agua de mezcla y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregados	174
Tabla A.4 Volumen de Agregado Grueso por volumen unitario de concreto	175
Tabla A.5 Resumen de cantidades unitarias por metro cubico	176

Apéndice C

Tabla C.1 Características de deterioro sistemas losa – muro con muro de mampostería	186
Tabla C.2 Características de deterioro sistemas losa – muro con muro de concreto	187
Tabla C.1 Estados límites para mampostería confinada (Astroza y Schmidt,2004)	189

Apéndice D

Tabla D.1 Modelos sometidos a carga cíclica.....	190
---------------------------------------------------------	-----

CONTENIDO SINTETIZADO

Capítulo 1

Antecedentes

Se define el concepto de “Losa de Transferencia” para los fines del estudio. En este capítulo se expone de forma breve un poco de la historia que ha motivado la presente tesis, observándose ilustrativamente los diferentes sistemas de piso que son utilizados como losas de transferencia. Además se mencionan algunos trabajos de investigación experimental y analítica que se relacionan con capacidad de losas y así como el análisis y efecto de cargas lineales sobre losas. Finalmente se exponen los objetivos generales y específicos que se persiguen en el presente trabajo.

Capítulo 2

Edificios construidos con sistemas de piso de transferencia

Se tomaron dos edificios reales que ya fueron construidos en la Ciudad de México y que poseen un piso de transferencia. Al edificio A que cuenta con una losa de transferencia del tipo perimetralmente apoyada se le realizó un análisis completo del efecto del piso de transferencia en los cortantes generados por carga vertical y lateral en los tres primeros niveles. Para el edificio B se realizó un análisis cualitativo acerca de los puntos de relevancia de la estructuración del edificio relacionados con la losa de transferencia.

Capítulo 3

Análisis paramétrico para la evaluación de cortantes en muros sobre pisos de transferencia

En este capítulo se lleva a cabo un análisis paramétrico de un edificio ficticio propuesto, en donde se evalúan los cortantes en los muros del primer nivel sobre la losa de transferencia variando parámetros como espesor de la losa, cantidad de niveles del edificio, claros entre columnas y el tipo de apoyo asignado a los muros del primer nivel. Lo anterior con el fin de cuantificar el impacto de cada una de esas variables en el desempeño de los muros del primer nivel.

Capítulo 4

Propiedades de los modelos analizados con elementos finitos

Se establecen las bases teóricas consideradas para la generación de los modelos analizados con elementos finitos en el capítulo 5 y 6. Además se describen las características físicas y geométricas de cada uno de los modelos analizados.

Capítulo 5

Análisis no lineal con elementos finitos de modelos losa-muro ante carga vertical

En el capítulo 5 se realiza un análisis paramétrico detallado con el método de elementos finitos de un modelo losa-muro sometido únicamente a carga vertical transmitida a través del muro. Se consideró la variación de algunos parámetros el espesor de la losa, material que compone el muro (mampostería o concreto) y longitud del muro. A todos los modelos analizados se les asignaron propiedades no lineales de tal forma que se obtuvieron las curvas de capacidad de la losa en cada caso. También se realizó una evaluación de esfuerzos en determinados puntos clave dentro de cada modelo.

Capítulo 6

Análisis no lineal con elementos finitos de modelos losa-muro ante carga vertical y carga lateral

Se considera la variación de los mismos parámetros que en el capítulo 5, sin embargo en este capítulo además de la carga de servicio, a los modelos se les somete a una carga lateral monótonica ultima con el fin de determinar la capacidad total del sistema ante solicitaciones laterales. Al igual que en el capítulo 5 todos los modelos son analizados tanto en el rango lineal como no lineal. También se realiza un análisis comparativo de la rigidez inicial de cada sistema y se proponen estados límites de comportamiento en cada caso.

Capítulo 7

Diseño del Proyecto Experimental

Se realiza el diseño de un espécimen de prueba que consiste en un sistema losa-muro. Dicho diseño es la base de la construcción de dicho espécimen que se está llevando a cabo actualmente en el laboratorio de estructuras de la UAM-Azcapotzalco. Se detalla en el diseño de cada componente que comprende la prueba. El espécimen será probado ante una carga vertical de servicio y ante cargas cíclicas laterales para determinar su desempeño ante cargas sísmicas.

Capítulo 8

Coefficientes de momento para losa cuadrada con muro de carga al centro del claro

Derivado de los resultados obtenidos en el capítulo 5, en este capítulo se obtienen los coeficientes de momento para un sistema muro-losa cuyo muro se encuentra localizado simétricamente al centro del claro. Al final del mismo se realizan los comentarios respecto a los resultados obtenidos.

Al final de cada uno de los capítulos se encuentra una sección de discusión en donde se realizan comentarios y conclusiones acerca de los puntos más relevantes y resultados obtenidos en cada capítulo. Finalmente el presente trabajo cuenta con cuatro apéndices con temas relacionados a los tratados a lo largo de la tesis.

INTRODUCCIÓN

En vista de los conocimientos cada vez más precisos del comportamiento de los materiales y de los sistemas estructurales continuamente se diseñan sistemas constructivos más osados y novedosos, no obstante, en la mayor parte de los casos al inicio dichos sistemas no se encuentran reglamentados y su desarrollo, diseño y construcción se apoyan únicamente en la pericia de los ingenieros que diseñan y en el cumplimiento mínimo de los requerimientos de los reglamentos. Sin embargo, lo anterior en ningún momento garantiza que tal sistema sea el más adecuado o resistente ante las solicitaciones a las que pueda ser sometido.

El caso de estructuras con losas de transferencia, objeto de estudio de esta tesis, es un tema que se inició a mediados de los años 90 hasta la fecha, pese a ello existe escasa información técnica fiable sobre la metodología de diseño, consideraciones y limitaciones que se deben tomar en cuenta para aplicar correctamente este tipo de sistema estructural. Es de resaltar sin embargo, que edificaciones estructuradas con losas de transferencia están siendo ampliamente utilizadas especialmente en la Ciudad de México, y diseñadas con una gran variedad de criterios, que en muchos de los casos podrían no ser los correctos, especialmente en una zona de alto riesgo sísmico.

A mediados del año 2009 un grupo de expertos del Área de Estructuras de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) y del Instituto de Ingeniería (UNAM), a través de un estudio patrocinado por la Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno del Distrito Federal, presentó un Informe denominado “Estudio de Observancia del Reglamento de Construcciones de D.F. y sus Normas Técnicas Complementarias” en donde se evaluaron las características estructurales de ciertos edificios construidos principalmente en la Colonia Roma que se presumían podían presentar un funcionamiento sísmico deficiente.

Aunque el informe antes mencionado no estaba directamente relacionado con el estudio de sistemas estructurales de losa de transferencia dio pie a conocer la gran cantidad de edificios construidos bajo ese tipo de configuración estructural, lo cual creó cierta preocupación en el gremio de ingenieros estructuristas en el Distrito Federal, dada la proliferación de estos sistemas constructivos y la poca información que se posee sobre su comportamiento ante cargas verticales y laterales.

El problema surge cuando los muros de los pisos superiores, que pueden ser de concreto o mampostería, no pueden ser continuados hasta los sótanos, en vista de que se requiere espacio

para los vehículos, por lo que la estructura inferior del edificio se construye a base de vigas y columnas, generalmente de concreto, prescindiendo de esta manera de los muros (excepto en algunos caso los que se encuentran en los linderos de la estructura). Esta situación provoca que el muro no necesariamente coincida con alguno de los ejes principales de la estructura de sótano ocasionando grandes esfuerzos cortantes en dichos muros principalmente debido a las deflexiones, en algunos casos excesivas, que se presentan en la losa.

El presente trabajo consiste en un estudio analítico acerca del sistema estructural denominado “losa de transferencia”, para edificios de mediana altura, entre 3 y 7 niveles sobre dicha losa. En el estudio se analiza la interacción entre el muro y la losa sobre la cual se apoya.

También se establecen las bases analíticas y de diseño para la realización de un proyecto experimental para estudiar el comportamiento ante carga vertical y lateral de un sistema losa-muro.

CAPITULO 1

Antecedentes

1.1 INTRODUCCIÓN

En este primer capítulo se describe lo que se entiende por un sistema estructurado a base de losas de transferencia. También se presenta una breve reseña sobre la revisión de literatura e investigaciones relacionadas con losas que soportan diferentes tipos de condiciones de cargas, que es el tema de esta tesis. En la parte final del capítulo se presentan los objetivos de la tesis y un breve resumen de lo que trata cada capítulo.

1.2 UN ESTUDIO DE OBSERVANCIA DEL REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES DEL DISTRITO FEDERAL

En años recientes se realizaron estudios para verificar el grado de observancia del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias, a raíz de la preocupación en algunos sectores de profesionales sobre los diseños de edificios nuevos construidos en la Ciudad de México (Gómez Soberón et al. 2009). En este proyecto, además del Área de Estructuras de la Universidad Autónoma Metropolitana (AE-UAM), intervino el Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM). El área de estudio de los edificios analizados por parte del AE-UAM es un sector de la colonia Roma (CR).

Se seleccionó la CR debido a que se cuenta con información y con experiencias pasadas en estudios de vulnerabilidad de edificaciones. Para realizar el estudio se partió de que los edificios a analizar deberían de tener más de 4 niveles, ser construidas o proyectadas de 2004 a la fecha y estar ubicadas en la colonia Roma. El trabajo realizado para verificar el grado de observancia se dividió en dos etapas:

- 1) Evaluación simplificada de resistencia lateral. A partir de una base de datos de 43 edificios se obtuvo un índice de configuración estructural con el cual se clasificó a cada estructura. Las edificaciones que resultaron con menor calificación fueron estudiadas en detalle en la segunda etapa. Para este estudio se dispuso de planos y memorias de cálculo de los sistemas seleccionados. Con esta información se evaluó un índice de la capacidad sismorresistente, que se estimó con base de las resistencias de los elementos verticales resistentes a carga lateral y del coeficiente sísmico. Las estructuras con los índices más bajos en alguna de sus direcciones principales fueron consideradas para los estudios detallados.

- 2) Análisis detallados. Los cinco edificios con menor calificación en la etapa preliminar fueron estudiados en detalle para lo cual se realizaron modelos en algún programa comercial para verificar el grado de observancia del RCDF. Para esto se realizaron los modelos elásticos de las estructuras con base en el espectro de diseño de la zona de su ubicación, y se obtuvieron resultados globales del edificio (periodos, modos, desplazamientos, distorsiones), así como los elementos mecánicos de todos los miembros, para las diferentes combinaciones de carga estudiadas. Para cada estructura se verificaron desplazamientos de entrepiso máximos, deflexiones, y la seguridad resistente de los elementos que las componen.

En el trabajo se observó que se está extendiendo el uso de losas de transferencia; se concluye que al usar sistemas de piso a base de losas de transferencia, éstas pueden verse sometidas a efectos de penetración y a grandes fuerzas cortantes en los muros de carga, las que no son consideradas de manera adecuada en el diseño.

En la continuación de la investigación, o segunda parte del proyecto, se realizó otra selección aleatoria de edificios, en la misma Colonia Roma. De cerca de 100 estructuras de la muestra, se seleccionaron aleatoriamente 20, para las cuales se solicitaron sus planos y memorias de cálculo a la Secretaría de Obras del Gobierno del Distrito Federal. Con la información proporcionada, se seleccionaron aleatoriamente cinco edificios para estudios detallados con el mismo procedimiento de la primera parte. Se verificó la rigidez y resistencia a carga sísmica de las estructuras, y se estableció un panorama del grado de observancia de las Normas Técnicas Complementarias en el diseño de nuevas construcciones, destacando los sistemas bien diseñados y las deficiencias detectadas.

Tres de los cinco edificios seleccionados para su análisis detallado, están contruidos con el sistema estructural de losas de transferencia y, de nuevo, se detectan las mismas deficiencias en el modelo utilizado para cada edificio.

1.3 LOSAS DE TRANSFERENCIA

Se entiende por un edificio estructurado con “losa de transferencia”, aquel que está formado por dos estructuras como se ilustra en la *figura 1.1*, en donde la estructura inferior generalmente está formada por marcos de concreto o, en algunos casos, de acero utilizados en la mayoría de los casos, para estacionamientos vehiculares, estas subestructuras pueden tener desde un nivel hasta 3 o más.

La estructura superior puede estar formada por muros de carga contruidos de mampostería o concreto, o una combinación de ambos; también se pueden tener sistemas similares a los de la subestructura inferior; formados por marcos de concreto, aunque estos últimos son menos

comunes. Por lo general, en el caso de sistemas en base a muros estos son diseñados para resistir las fuerzas laterales en los edificios, comúnmente los únicos muros que continúan hasta el sótano son los muros colindantes o exteriores de la estructura. Se han encontrado edificios donde la estructura sobre la losa de transferencia llega a 8 niveles.

Entre las dos estructuras antes mencionadas se encuentra la losa de transferencia. La característica principal de esta losa es que la estructura superior se apoya en ella; es decir que la mayor parte de los elementos portantes de la estructura superior cargan directamente sobre la losa y no sobre trabes o columnas, como sucede en estructuras convencionales. Este detalle de estructuración crea un sistema estructuras discontinuo, generando en algunos casos agrietamientos excesivos en los muros de los primeros niveles de la estructura superior, debido a que dichos muros no se encuentran apoyados sobre base rígida sino más bien, sobre una losa de entrepiso que es propensa a sufrir deformaciones mayores a las comunes, dependiendo de la carga aplicada sobre ella y de las características propias de la losa.

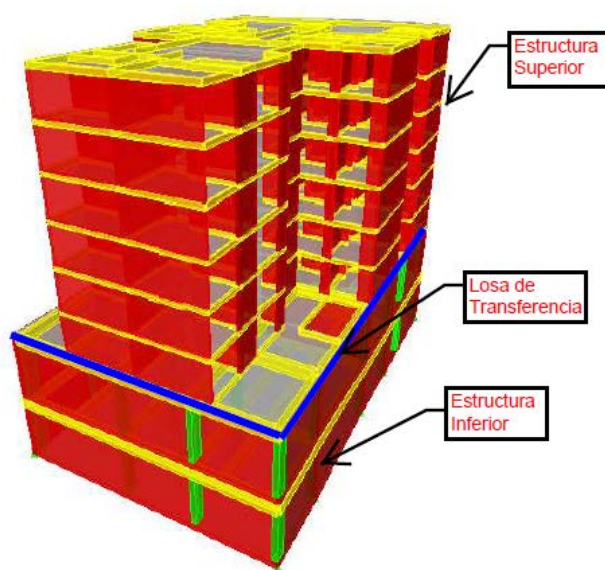


Figura 1.1 Configuración típica de sistemas con Losas de Transferencia

Además de lo anterior, se ha observado que existe otro problema a ser tomado en cuenta; es el que se refiere al anclaje entre el sistema muro–losa de transferencia o columna–losa de transferencia. Aunque el estudio del anclaje muro-losa está fuera del alcance de esta tesis, debe ser tomado en cuenta en investigaciones futuras en vista de que podría ser decisivo en el buen comportamiento sísmico de la estructura. Hay que tomar en cuenta que en el periodo en el que la mayor parte de edificios con losas de transferencia se han construido en México no ha ocurrido un sismo de importancia. Por lo tanto, no se tienen parámetros comparativos de su comportamiento real, por lo que su diseño está basado únicamente en modelos analíticos.

Específicamente, en la última década se ha extendido el uso de estos sistemas estructurales, especialmente en las ciudades más grandes. Edificios con losas de transferencia son construidos generalmente en zonas de mayor poder adquisitivo, en donde el alto costo de los terrenos no permite se construyan en ellos estacionamientos para vehículos. Por lo tanto, es necesario que el edificio que se construye posea espacios para los vehículos propios lo cual se logra adaptando los sótanos para este fin.



Figura 1.2. Edificio A, con losa de transferencia reticular o plana

Es importante mencionar que se han encontrado diferentes variantes en el tipo de losas que funcionan como losas de transferencia. Por ejemplo, en la *figura 1.2* se muestra un edificio que posee una losa de transferencia plana (reticular) de concreto. Como se puede ver en las *figuras 1.2* y *1.3* la estructuración del edificio en la parte superior de la losa es muy diferente a la que se observa en los sótanos. También se pueden encontrar edificios con sistemas de transferencia formados por una losa maciza y trabes secundarias de concreto, tal como lo muestra la *figura 1.3*.

En muchos casos, en la parte superior se tiene una estructura a base de muros de mampostería confinada apoyados en una losa de transferencia; bajo de ella el sistema estructural cambia y pasa a estar formado por marcos de concreto reforzado. De esta forma se presenta una discontinuidad estructural. Al diseñar resulta crucial determinar qué tipo de consideraciones y suposiciones se deben de hacer. Por ejemplo, si se debe considerar como dos estructuras separadas, modelando la estructura superior y luego simplemente transferiendo las cargas a la estructura de sótanos, modelando ésta como una estructura independiente. O, por el contrario, si se debe modelar considerando el total de la estructura como una unidad. Es por ello que resulta de suma importancia conocer el comportamiento y la influencia de la losa de transferencia en el resto del edificio, con el fin de establecer recomendaciones y limitaciones

sobre el uso de estos sistemas estructurales y para generar modelos que se aproximen de mejor manera a la realidad.

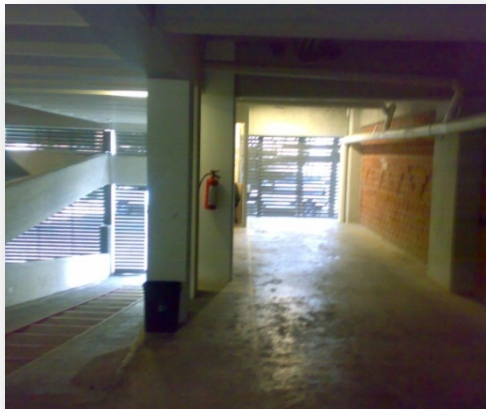


Figura 1.3 Edificio con sistema de piso de transferencia formado por losa maciza y vigas secundarias.



Figura 1.4 Edificio con losa de transferencia y con sistema vigueta y bovedilla en pisos superiores.

Otro tipo de estructura que se encontró durante el estudio, fue la de edificios que usan sistemas de vigueta y bovedilla como losa de transferencia (figura 1.4). Asimismo, también se hallaron sistemas estructurales en donde se usa una estructura inferior construida de marcos de acero y sobre el cual se utiliza el sistema de piso de “Losacero” que sirve para desplantar la estructura superior, como se aprecian en la figura 1.5.

El uso de sistemas a base de losas de transferencia tiende a ser cada vez más osado, en vista de que se manejan en algunos puntos espesores de 10 centímetros. Es probable que en algunos casos este espesor sea insuficiente para soportar las elevadas cargas verticales, los momentos de flexión y los esfuerzos cortantes producidos por muros de carga que se soportan directamente sobre la losa.

Además de lo anterior, también parecen insuficientes los anclajes entre los muros y la losa. Se corre el riesgo de que este tipo de losas se comporten como diafragmas flexibles lo cual, en caso de un sismo, ocasionaría serios daños a la estructura, poniendo en peligro su integridad estructural.



Figura 1.5 Edificio con losa de transferencia de “Losacero” y marcos de acero

1.4 TRABAJOS RELACIONADOS CON EL ESTUDIO DE LOSAS

El tema de los sistemas estructurales basados en losas de transferencia es relativamente nuevo, en el sentido de que no se encontraron publicaciones relacionadas directamente con este tópico, ya sean éstos de carácter experimental o analítico.

Dado que uno de los objetivos de la presente tesis es determinar curvas de capacidad para ciertas losas cargadas por un muro, los trabajos de investigación citados en esta sección se orientan a aquellos estudios en donde se determinan curvas de capacidad en losas de concreto reforzado bajo diferentes estados y tipos de carga, o bien que estudien el efecto de cargas lineales sobre la losa.

Aunque no relacionados directamente con sistemas muro-losa, existen numerosas investigaciones, experimentales y analíticas sobre la capacidad de losas experimental y analíticamente. Sin embargo, en relación con el efecto de cargas lineales sobre losas las publicaciones son escasas.

1.4.1 INVESTIGACIONES ANALÍTICAS

A continuación se comentan brevemente algunas investigaciones analíticas acerca de la capacidad de losas de concreto y sobre cargas lineales en losas de concreto.

1.4.1.1 TRABAJO DE WOODRING Y SIESS (1963)

Esta investigación se llevó a cabo como parte de la tesis de doctorado de Woodring, bajo la asesoría de Siess en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, la cual se basó en un estudio analítico de losas continuas sujetas a cargas concentradas.

En el estudio se expone que la carga provocada por un muro sobre la losa se puede considerar ya sea como un tipo de carga concentrada o también como una carga distribuida en un área muy pequeña, la cual, dependiendo de su ubicación dentro del tablero de losa, puede provocar diferentes momentos y esfuerzos. Para considerar este tipo de cargas sobre la losa (concentradas o lineales) la mayoría de los códigos de construcción y diseño comúnmente asignan una carga uniformemente distribuida sobre la losa para tomar en cuenta de alguna manera el efecto de la carga concentrada.

Sin embargo, en muchas ocasiones esa carga asignada no se apega a la realidad en vista de que se le impone a la losa una carga uniformemente distribuida en toda su área, que es independiente del tamaño o posición del muro. Por consiguiente, en algunos casos el uso de la carga uniformemente distribuida equivalente puede ser conservador para estimar el momento en algunos puntos de la losa y no conservador en otros.

Entonces debido a que resulta poco práctico y tedioso establecer estados de carga en la losa para cada ubicación de las cargas concentradas, este estudio se basó en establecer coeficientes de influencia o más bien superficies de influencia en base a dichos coeficientes. El objetivo de la investigación fue el estudio de los momentos en los paneles interiores de una losa continua sujeta a cargas concentradas o a cargas distribuidas sobre una porción del panel.

1.4.1.1.2 Cargas Lineales Sobre losas

En esa tesis se dedicó una pequeña parte al estudio de cargas lineales, es decir, muros apoyados directamente sobre la losa. Si se tiene un muro con un peso unitario ω , con una longitud L_m y altura h la carga total del muro estará dada por:

$$W_m = \omega L_m h$$

Entonces, la carga uniformemente distribuida equivalente sobre el panel está dada por:

$$W = \frac{W_m C}{L_m^2} = \frac{\omega C h}{L_m}$$

donde C es el coeficiente de influencia.

Es de hacer notar que la investigación de Woodring y Siess se limitó al estudio de un tablero interior. En lo que se refiere al tema de esta tesis la parte que corresponde a la influencia de cargas lineales es útil; sin embargo, en una forma limitada, en vista de que se pueden presentar

una gran variedad de relaciones entre largo y ancho de la losa; también las cargas que se consideran en ese estudio son de muros divisorios y no muros de carga, por lo que las diferencias de carga que dichos muros le pueden transmitir a la losa pueden ser muy grandes.

1.4.1.2 TRABAJO DE ANDREASEN y NIELSEN (1986)

Su trabajo tiene como objetivo establecer expresiones para la capacidad de carga de losas rectangulares de concreto bajo diferentes condiciones de apoyo tomando en cuenta el efecto de membrana.

Los autores sostienen que los cambios en la geometría, en algunas ocasiones, tienen un considerable efecto en la capacidad de carga de la losa; a tales efectos se les conoce como efectos de membrana. Considerando una carga uniformemente distribuida sobre la losa rectangular mostrada en la *figura 1.6* y utilizando el método de trabajo virtual, a través del teorema de límite superior, se determinó la siguiente expresión para la capacidad de carga de la losa:

$$\frac{P}{h^2 f_c} = \frac{24}{\frac{a}{b} \left(\sqrt{3 + \left(\frac{a}{b}\right)^2} - \frac{a}{b} \right)^2} (m + m_n + m_m) \quad (1.1)$$

P = carga total sobre la losa

h = espesor de la losa

f_c = Resistencia a la compresión del concreto

m = momento adimensional

m_n = momento adimensional de reducción

m_m = momento de membrana

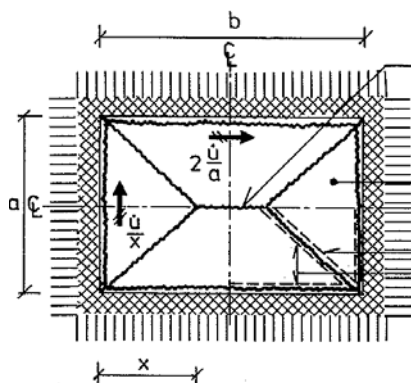


Figura 1.6 Losa rectangular empotrada en todos sus bordes y cargada uniformemente

Basado en la ecuación 1.1 se generan curvas de capacidad de carga en términos de la deflexión relativa de la losa y de la cuantía de acero en el lecho inferior de la losa, tal como lo muestra la figura 1.7.

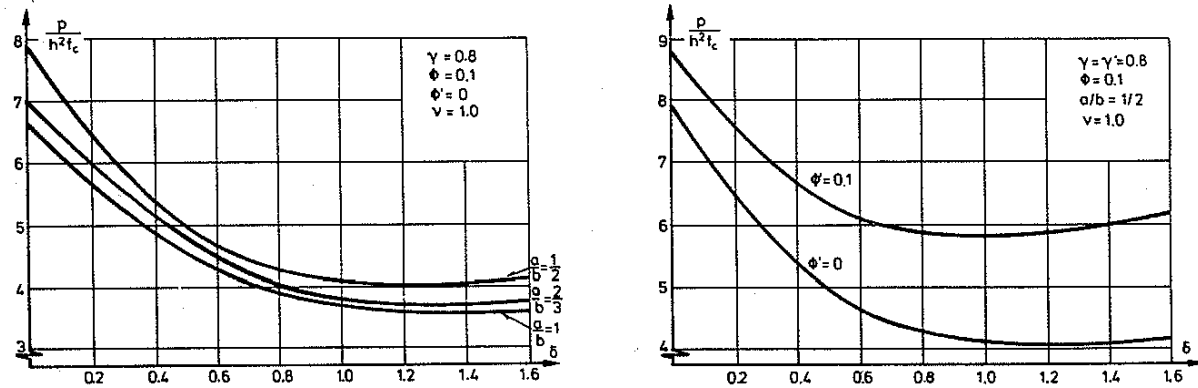


Figura 1.7 Curvas de capacidad de carga en función de la deflexión relativa en losas rectangulares con bordes empotrados

1.4.1.3 TRABAJO DE KENNEDY y GOODCHILD (2003)

La investigación de Kennedy y Goodchild está orientada al diseño práctico de losas a través de la Teoría de la Línea de Fluencia. Hacen una propuesta interesante acerca del diseño de losas cuando se tienen cargas lineales (muros) en conjunto con la carga distribuida de la losa, sin embargo el método posee ciertas limitantes.

Los autores comentan que, generalmente, las cargas de muros de partición son tratados como una carga viva uniformemente distribuida. No obstante, en algunas ocasiones dichas cargas son particularmente altas; en tal caso, resulta más apropiado tratar a la carga como lineal independiente. Sin embargo, en el método simplificado que proponen, se incluyen ciertas limitantes relacionadas con el tamaño de la losa, las condiciones de apoyo, la carga distribuida sobre la losa y la carga que transmite el muro.

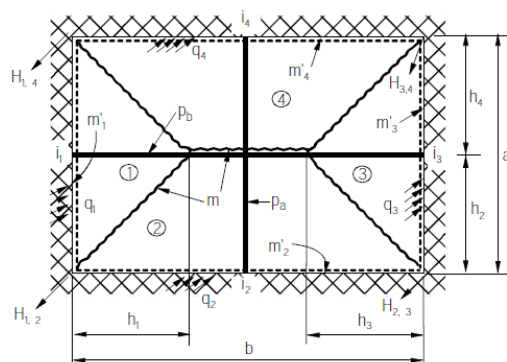


Figura 1.8 Losa rectangular empotrada en todos sus bordes y cargada uniformemente

De la figura 1.8:

m = momento ultimo positivo por unidad de longitud, a lo largo de la linea de fluencia

m' = momento último negativo por unidad de longitud, a lo largo

de la línea de fluencia

p_a, p_b = carga lineal (particiones)

n = carga última uniformemente distribuida

i_1, i_2, i_3, i_4 = se refieren al grado de fijación existente en los bordes

De acuerdo a las definiciones anteriores se tiene:

Tabla 1.1 Formulación para losas con cargas lineales empotradas en los cuatro bordes

Relaciones de Fijación	$i_1 = \frac{m'_1}{m}, i_2 = \frac{m'_2}{m}, i_3 = \frac{m'_3}{m}, i_4 = \frac{m'_4}{m}$
Factores de Carga Lineal	$\alpha = \frac{p_a}{nxb} \quad \beta = \frac{p_b}{nxa}$
Lados Reducidos	$a_r = \frac{2a}{\sqrt{1+i_2} + \sqrt{1+i_4}} \quad b_r = \frac{2b}{\sqrt{1+i_1} + \sqrt{1+i_3}}$
Carga Ajustada	$n^* = n(1 + \alpha + 2\beta)$
Lados Reducidos Ajustados	$b_r^* = b_r \sqrt{\frac{1 + \alpha + 2\beta}{1 + 3\beta}}$
Momento de Diseño	$m = \frac{n^* x a_r x b_r^*}{8(1 + \frac{b_r^*}{a_r} + \frac{a_r}{b_r^*})}$

La limitación aparece cuando se calculan los valores de α y β ; si estos sobrepasan el valor de 0.35 la aplicación del método es incierta; por tanto, no se recomienda para valores mayores, en esos casos es necesario recurrir a métodos de trabajo o de equilibrio para el análisis.

En muchos estudios analíticos, cuando se presentan muros con cargas elevadas sobre la losa, sus autores hacen referencia a la formulación realizada por Johansen (1943) en su Teoría de las Líneas de Fluencia. En dicho trabajo se enfoca el tema de cargas lineales sobre una losa y se destaca el hecho que se podrían presentar líneas de fluencia curvas.

Para tratar este caso se propone un método simplificado a base de polígonos para resolver el problema; sin embargo, tal planteamiento requiere de mucha pericia para determinar los ángulos de los polígonos resultantes y, por tanto, no se considera muy práctico.

1.4.1.4 NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO DEL REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES DEL DISTRITO FEDERAL (2004)

Las NTC-C/2004 en su sección 6.3 en referencia a losas de entrepiso, tienen un pequeño apartado que considera la conversión de una carga lineal, producida por un muro divisorio que descansa sobre una losa apoyada perimetralmente, a una carga equivalente uniformemente repartida sobre el área del tablero en cuestión.

Se propone simplemente determinar el peso total del muro y dividirlo entre el área del tablero, este valor se multiplica por un coeficiente que depende tanto de la relación largo-ancho de la mima, como de la orientación del muro respecto a los bordes de la losa, es decir, si este es paralelo al lado corto o al lado largo del tablero. Se presenta la siguiente tabla de coeficientes:

Tabla 1.2 Factores para considerar las cargas lineales como cargas uniformes equivalentes

Relación de lados $m = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$	0.50	0.80	1.00
Muro paralelo al lado corto	1.30	1.50	1.60
Muro paralelo al lado largo	1.80	1.70	1.60

Sin embargo, para utilizar correctamente los factores de la tabla 1.2 la carga uniforme equivalente del muro no debe exceder del 50% de la carga total de la losa. En el caso que estamos estudiando, en el cual el muro que se apoya en la losa es soporta las cargas verticales de los pisos superiores, raras veces se podrá cumplir, en vista de que en la mayoría de los casos la carga equivalente del muro puede ser varias veces mayor que la carga total de la losa.

Además de la limitación mencionada en el párrafo anterior, no se considera en el reglamento la posición del muro dentro del tablero. En algunos casos como, por ejemplo, en muros divisorios este punto podría ser irrelevante pero en otros, como cuando se tienen muros de carga directamente apoyados sobre la losa este aspecto no se puede despreciar.

1.4.2 INVESTIGACIONES EXPERIMENTALES

Existen numerosos estudios experimentales sobre la capacidad de resistencia de losas de concreto reforzado para diferentes condiciones de carga y relaciones de aspecto de la losa. Sin embargo, tampoco en el área experimental se registran ensayos relacionados directamente con sistemas losa-muro. La mayor parte de tales estudios han estado dirigidos al caso de losas uniformemente cargadas, a estudios de capacidad bajo cargas concentradas, a punzonamiento en losas, interacción losa columna, por mencionar algunos.

A continuación se exponen en forma breve algunos resultados derivados de pruebas experimentales realizadas en losas de concreto reforzados.

1.4.2.1 PRUEBAS REALIZADAS EN LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE BERLÍN (1963)

A principios de los años sesentas se llevó a cabo un extenso programa de experimentos en losas de concreto conducidos por A. Sawczuk y T. Jaeger (1963) en las cuales se probaron un total de 134 losas rectangulares bajo cargas uniformes y concentradas, para diferentes condiciones de apoyo.

Jaeger concluye que la teoría de la línea de fluencia proporciona una estimación bastante confiable de la carga última de la losa; sin embargo, también menciona que el diseñador debe tener presente siempre las condiciones de servicio, de tal forma que si la distribución de refuerzo difiere en gran medida de la prescrita por la teoría elástica pueden ocurrir grandes agrietamientos bajo condiciones de servicio.

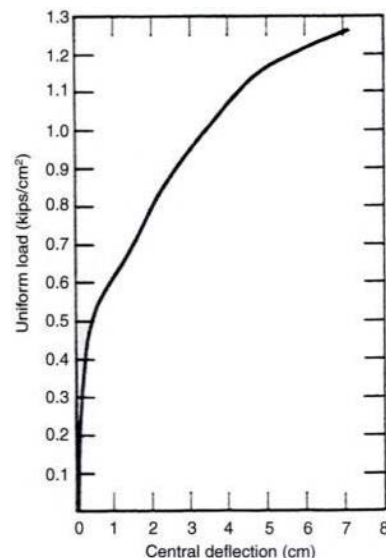
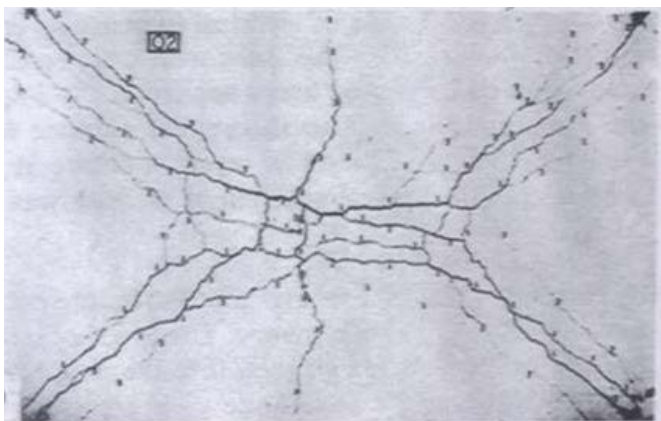


Figura 1.9 Izq.) Agrietamiento ultimo para una de las losas probadas uniformemente cargada y simplemente apoyada en todos sus bordes, Der.) Curva de Capacidad de una de las losas probadas.

1.4.2.2 TRABAJO DE VECCHIO Y TANG (1990)

En él se estudia la influencia de la acción compresiva de membrana, para lo cual se construyeron dos especímenes a escala natural en donde uno se diferenció del otro en las restricciones de apoyo como se observa en la *figura 1.10*. Se destaca el hecho de que el espécimen restringido lateralmente mostró un incremento en su rigidez a flexión y capacidad de carga.

Básicamente, los especímenes están compuestos por una losa de 10 cm de espesor y 150 de ancho; a 158.5 cm en ambos bordes se encuentran una columna de apoyo de 20x20 cm. La carga monotónica incremental lineal P , ubicada al centro del claro, se imparte a través de un perfil metálico que cruza el ancho completo de la losa en el punto medio del claro central.

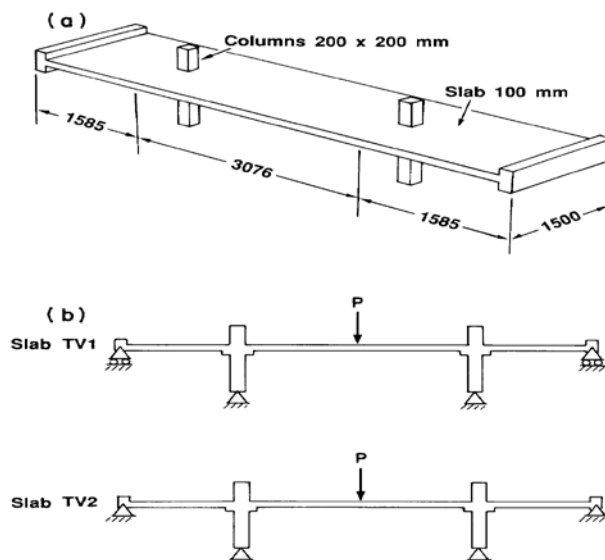


Figura 1.10 Vista general de los especímenes de losa de banda, a) configuración de la losa de banda, b) condiciones de carga y apoyo.

La *figura 1.11* muestra una vista general de los principales elementos utilizados en las pruebas como ser los actuadores hidráulicos, el muro de reacción, la forma de aplicación de la carga vertical etc.

El modelo restringido en sus apoyos mostró mejor comportamiento, como resultado de la acción compresiva de membrana, a través de la aplicación de altas cargas compresivas en la losa de prueba. La curva de capacidad a carga vertical mostrada en la *figura 1.12.lzq.* muestra una resistencia superior a la del modelo restringido en los apoyos.

Aunque el estudio no estuvo dirigido a obtener curvas de resistencia de los especímenes, sino a determinar la influencia del efecto compresivo de membrana, se obtuvieron curvas de capacidad de carga contra desplazamiento, así como patrones de agrietamiento, para ambos modelos.

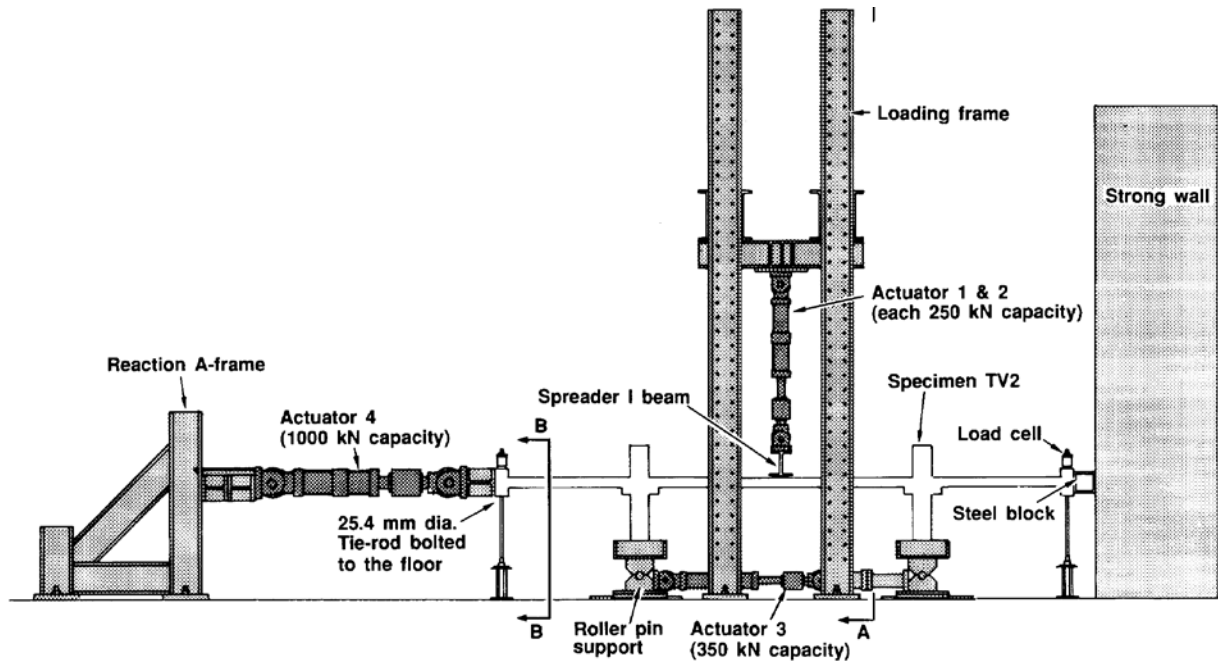


Figura 1.11 Configuración del espécimen de prueba

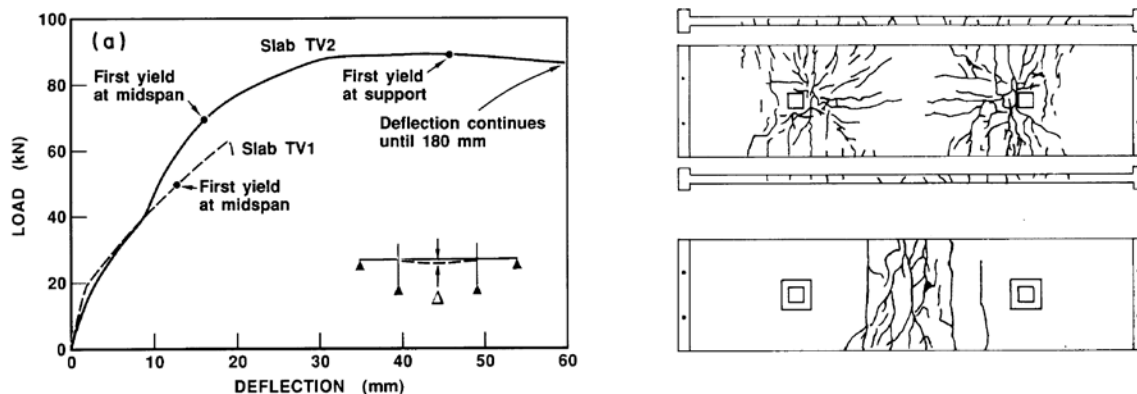


Figura 1.12 Izq.) Gráfico carga - deformación de los especímenes probados, b) Patrón de agrietamiento modelo TV2

1.4.2.3 TRABAJO DE HOPKINS Y PARK (1971)

Como se observa en la *figura 1.13*, el espécimen consiste en un modelo de sistema de piso con nueve paneles de losa perimetralmente apoyados a una escala de $\frac{1}{4}$. Uno de los objetivos principales del estudio era el de tomar en cuenta la acción de membrana en compresión, de tal forma que se pudiese estimar el estado del espécimen tanto en condiciones de servicio como de carga última.

La carga de diseño ultima estimada era de 38.3 kN/m^2 , para ello fue necesario aplicar un factor de incremento (Carga última/carga Johansen) de 2 al panel interior, 1.35 a los paneles centrales

de borde y de 1 a los de esquina. Respecto al refuerzo de los paneles estos se encontraban apenas reforzados del 0.15% y 0.16% del área bruta de concreto.

En relación a las dimensiones del espécimen, el espesor de losa de todos los paneles fue de 49.2 mm, mientras que los claros entre centros de las vigas eran de 1.68x1.68m para el panel interior, 1.68x1.22 para los paneles centrales de borde y 1.22x1.22 para los de esquina.

En la prueba se determinó que el comportamiento del sistema en general hasta una carga distribuida de 18 KN/m² era excelente; sin embargo, al aumentar la carga hasta un valor de 21.5 KN/m², el espécimen experimentó un aumento significativo de deflexiones y fisuramientos.

Es interesante mencionar que cuando se tomaron las medidas del ancho de las grietas éstas se consideraron inaceptables para el nivel de carga aplicado, es decir, de servicio. Finalmente, la carga de falla fue un 6% mayor que la carga última de diseño; a esa altura las grietas mostraban patrones de líneas de fluencia avanzados.

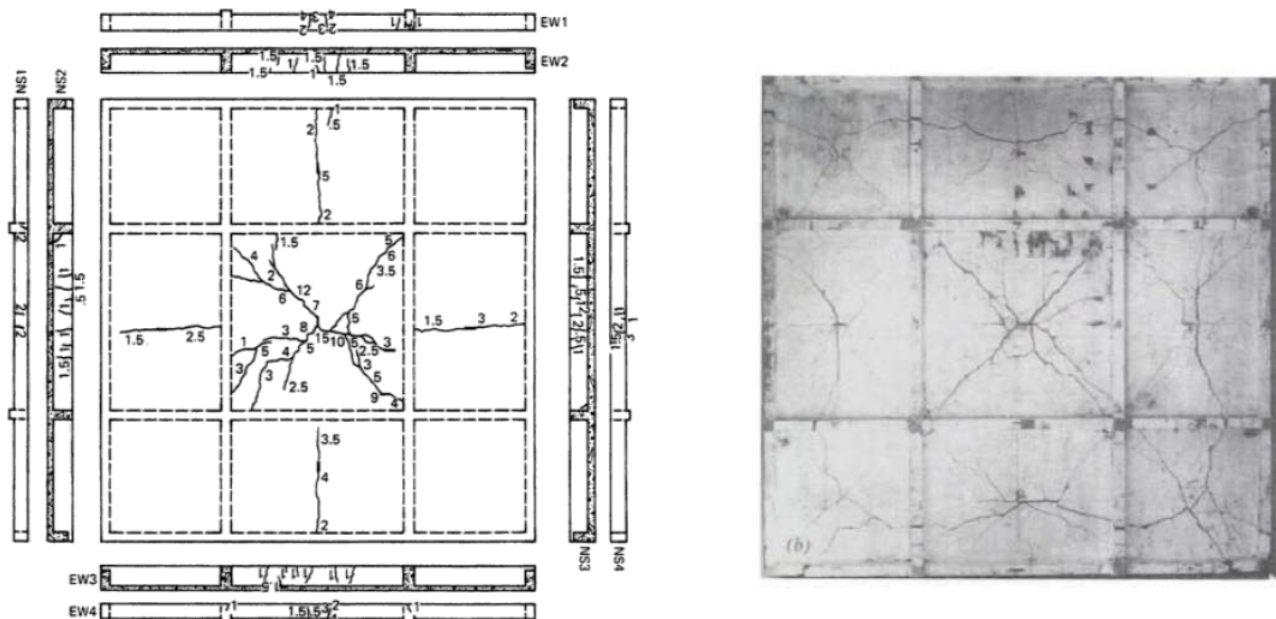


Figura 1.13 Izq.) Patrón de agrietamiento para piso de losa y viga a 21.5 KN/m², Der.) Superficie no cargada después de la prueba

1.5 OBJETIVOS DE LA TESIS

A continuación se exponen los objetivos principales y específicos de esta tesis, en base a la problemática de los sistemas estructurados con pisos de transferencia.

1.5.1 OBJETIVO GENERAL

- Realizar un estudio analítico sobre el sistema estructural conocido como “losas de transferencia” usado en la construcción de edificios de mediana altura, para entender mejor la interacción entre los muros y la losa sobre la que descansan y, de esta manera, poder definir las bases para un estudio experimental.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar análisis paramétricos de edificios con losas de transferencia a nivel macro, es decir, considerando la interacción del piso de transferencia con el resto de la estructura y a nivel local.
- Realizar un estudio paramétrico con elementos finitos de sistemas muro-losa, considerando acciones verticales y laterales en las estructuras, con el fin de determinar las respuestas e interacciones que se presenten en dichos sistemas para establecer ciertas recomendaciones y limitaciones para su diseño y construcción.
- Determinar el efecto en los cortantes generados en los muros ocasionados por las deformaciones en la losa de transferencia.
- Asociar las curvas de capacidad de los modelos con niveles de daño.
- Estimar los coeficientes de momento para un tablero de losa aislado con un muro de carga localizado simétricamente al centro del claro.
- Diseñar un espécimen de un sistema muro-losa que, como complemento al estudio analítico, será construido y ensayado en el laboratorio de estructuras de la UAM-Azcapotzalco.
- Hacer claros cualitativa y cuantitativamente los problemas que se generan en los muros y en las losa cuando se tienen edificios estructurados con losas de transferencia.

1.6 DISCUSIÓN

Es interesante hacer notar la gran cantidad de edificios que se están construyendo actualmente con sistemas de losa de transferencia y la poca información y estudios acerca del comportamiento de este tipo de estructuras. Lo anterior queda evidenciado en la falta de literatura relacionada directamente con el tema.

Queda claro que el tema tratado en esta tesis es muy extenso. Difícilmente se podrían cubrir todos los aspectos pertinentes en un solo estudio. Por lo tanto debería haber una continuidad en la línea de investigación acerca del tema, tocando otros aspectos y variables no cubiertos en el presente trabajo, de tal forma que se genere una base de datos sólida, producto de varias investigaciones, con el propósito de formular soluciones viables a los diferentes problemas que presentan este tipo de estructuración.

CAPÍTULO 2

Edificios contruidos con sistemas de piso de transferencia

2.1 INTRODUCCIÓN

La construcción de edificios estructurados con sistemas de losa de transferencia se ha vuelto una práctica común en algunas zonas de la Ciudad de México, en donde en los últimos años se ha observado un incremento significativo en la construcción de este tipo de estructuras.

En el presente capítulo se resumen algunos resultados de análisis de dos edificios contruidos en la Ciudad de México, y que forman parte de la base de datos de los edificios descritos en el Capítulo 1. Uno de los inmuebles (edificio A), tiene un sistema de piso de transferencia formado por una combinación de losa maciza perimetralmente apoyada y losa plana aligerada.

El segundo edificio (edificio B) se construyó con un sistema de piso con una losa de transferencia mixta, porque se utilizó en gran parte de la planta una losa reticular (o losa plana aligerada) y el resto de la planta se solucionó con una losa maciza (paneles de losa perimetralmente apoyados).

2.2 ANÁLISIS DE LOS EDIFICIOS REALES ESTUDIADOS

Se identificará a estos dos edificios estudiados sólo como edificio A y edificio B. Los edificios de analizaron tridimensionalmente con el programa ETABS v.9.6. Se asignaron elementos tipo Shell, tanto a los muros como a la losa, mallándolos, de tal forma que se garantice una continuidad y adecuada transmisión de fuerzas nodales entre la losa y los muros. En este sentido, la naturaleza de los modelos no permite que haya separación o desprendimiento entre la losa y los muros de la estructura.

2.2.1 EDIFICIO A

Se trata de un edificio para uso habitacional de seis niveles sobre el nivel de terreno y un cajón de cimentación construido en dos cuerpos. El primer nivel sobre el terreno está destinado a estacionamiento y es de columnas de concreto reforzado; los cinco restantes son de departamentos y están estructurados con muros de carga de mampostería de tabique rojo combinados con muros de concreto reforzado.

Las losas de los entrepisos son de distintos tipos. Solo la losa tapa y la del primer nivel son de concreto reforzado, coladas en sitio, las restantes son de vigueta y bovedilla; aligeradas con poliestireno. También la losa de cimentación es de concreto reforzado, con contratraves invertidas.

La losa del nivel +4.30 m es maciza de concreto reforzado de 12 cm de espesor entre los ejes A y C, y H y K, mientras que entre los ejes D y H es una losa nervada, con vigas de 50 cm de peralte y un firme de concreto de 5 cm. Sobre este piso que funciona como *losa de transferencia* se desplantan cinco niveles de mampostería, los cuales tienen un sistema de piso a base de vigueta y bovedilla.

Sin embargo, no existe una continuidad en los elementos verticales que garantice un flujo de carga directo hacia la cimentación, pues los muros de los cinco niveles superiores no se continúan hasta la base sino que descansan en la llamada *losa de transferencia*.

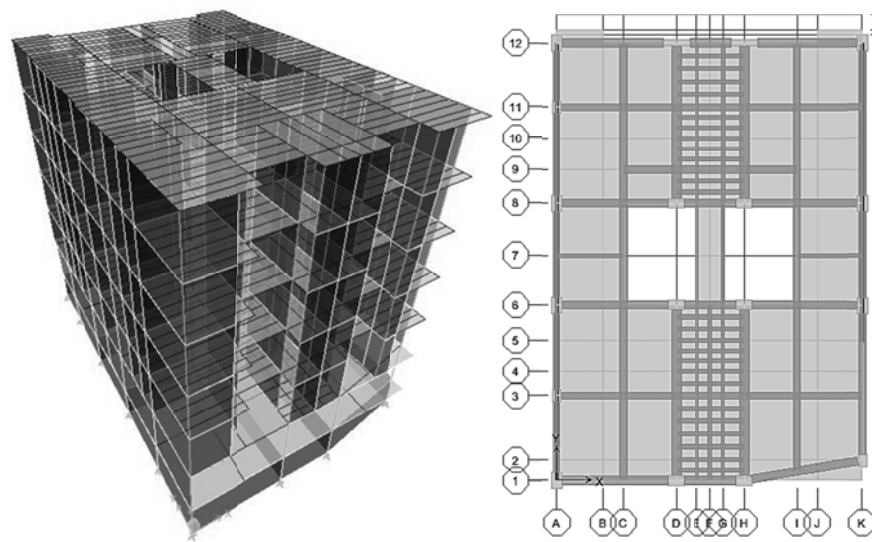


Figura 2.1 Edificio A

2.2.1.1 CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA EN EL PRIMER NIVEL

La *figura 2.2.lzq* nos muestra la distribución de muros que se desplantan en el piso de transferencia; en color azul se muestran los muros de concreto localizados en las esquinas y al centro de la planta, mientras que en color naranja se representan los muros de mampostería. Traslapando las dos imágenes de la *figura 2.2* se puede apreciar la posición en la que descarga el muro sobre el piso de transferencia.

El piso de transferencia (*figura 2.2.Der*) presenta un sistema mixto formado por losas perimetralmente apoyadas y una losa plana aligerada; ambos sistemas descansan sobre un sistema de vigas aperaltados con dimensiones de 35x90 centímetros, las que transmiten las cargas a las columnas, las cuales alcanzan dimensiones de 50x80 centímetros.

Es notable el hecho de que, generalmente, en las losas de transferencia los elementos portantes, vigas y columnas, son de dimensiones mayores a las usadas comúnmente para edificios del mismo o similar tamaño. Además es común que el claro entre columnas sea considerable ya que en la estructura inferior de marcos de concreto el espacio es necesario para ser utilizado para estacionamientos vehiculares. Como ejemplo de lo anterior, en el edificio A, entre los ejes 1 y 6 se tiene un claro de 8.65 metros. Además hay que recordar que sobre esta losa desplanta un edificio de 5 niveles; por tal motivo los elementos estructurales como vigas y columnas poseen dimensiones mayores.

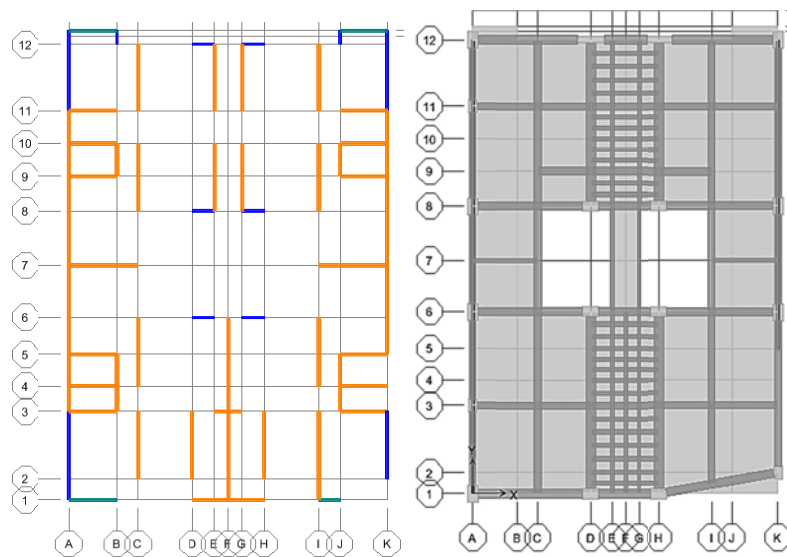


Figura 2.2 Izq.) Distribución de muros sobre losa de transferencia Edificio A, Der) Piso de Transferencia

2.2.1.2 ANÁLISIS DE CORTANTES EN EDIFICIO A

Se realizó un análisis completo de los cortantes que se presentan en todos los muros del edificio, incluyendo los muros de concreto, ante carga vertical y lateral. Del total de muros que conforman el edificio se escogieron para el análisis seis en la dirección corta y seis en la dirección larga de la estructura.

Se debe destacar que el cálculo de los cortantes en los muros no se limitó al primer nivel sino que también se determinaron en los muros de los niveles dos y tres; esto con el fin de identificar las variaciones en los pisos más altos. Sin embargo, se reportan solo los resultados del análisis correspondientes a los muros de mampostería, por ser estos los más sensibles a los efectos indeseables del cortante.

Para el análisis se utilizaron las combinaciones de carga que usualmente se aplican para fines de diseño. Primero, una condición de carga vertical en donde todas las cargas verticales fueron multiplicadas por un factor de 1.4, según lo establece la normativa vigente. Por otra parte, para

carga combinada, vertical y lateral, se formularon nueve combinaciones más, en donde algunas incluyen un espectro de diseño correspondiente a la zona en donde el Edificio A se encuentra construido. Para el edificio real con losa de transferencia se determinaron (LT) los cortantes por unidad de longitud para la carga vertical mayorada; también se estimaron los cortantes máximos que se dieron en cada muro para cada combinación de carga, los cuales son objetos de comparación en las tablas 2.1 y 2.2.

Tabla 2.1 Cortantes Edificio A, LT* versus BR*, en la dirección corta

No.	Muro	Longitud de muro (m)	Cortante Promedio (ton/m)				COCIENTE	
			LT*		BR*		GRAV LT/BR	LAT LT/BR
			GRAV**	LAT**	GRAV	LAT		
1	1FH-N1	1.70	1.65	6.70	0.03	2.18	55.00	3.07
	1FH-N2	1.70	0.97	6.15	0.11	3.20	8.82	1.92
	1FH-N3	1.70	0.59	4.82	0.16	3.12	3.69	1.54
2	1IJ-N1	1.00	-4.82	-7.52	0.22	1.10	21.91	6.84
	1IJ-N2	1.00	1.06	5.91	0.30	4.50	3.53	1.31
	1IJ-N3	1.00	1.66	5.59	0.75	3.54	2.21	1.58
3	3AB-N1	2.25	-3.82	-4.43	-0.27	-1.97	14.15	2.25
	3AB-N2	2.25	-3.56	-5.20	-0.74	-3.30	4.81	1.58
	3AB-N3	2.25	-2.97	-4.50	-1.03	-3.14	2.88	1.43
4	3FG-N1	0.65	0.24	4.50	0.01	1.93	24.00	2.33
	3FG-N2	0.65	-0.24	-4.15	0.11	2.45	2.18	1.69
	3FG-N3	0.65	-0.29	-3.18	0.10	2.17	2.90	1.47
5	4AB-N1	2.25	-3.47	-3.65	-0.14	-1.94	24.79	1.88
	4AB-N2	2.25	-2.80	-4.40	-0.38	-2.96	7.37	1.49
	4AB-N3	2.25	-2.11	-3.46	-0.53	-2.66	3.98	1.30
6	7AC-N1	3.25	-1.90	-3.94	0.02	-0.03	95.00	131.33
	7AC-N2	3.25	-1.25	-5.51	-0.07	0.22	17.86	25.05
	7AC-N3	3.25	-0.99	-4.51	-0.08	0.22	12.38	20.50

* LT (Edificio Real con losa de transferencia), BR (muros apoyados en base rígida)

** GRAV (Carga gravitacional mayorada), LAT(Combinación de Carga lateral más crítica)

Con el objeto de establecer la influencia de la losa de transferencia en los cortantes que se presentan en los muros se estudió otro modelo con base en el original, el cual se definió al realizar una sola modificación respecto al original. Esta consistió en eliminar los niveles que corresponden a los sótanos, compuestos por los marcos resistentes a momento, dejando así los muros del primer nivel apoyados sobre base rígida o indeformable. Al igual que al modelo del edificio real se aplicaron las mismas magnitudes y combinaciones de carga y se determinaron los cortantes para carga gravitacional y para la condición más crítica en cada muro, de acuerdo a las combinaciones de carga aplicadas.

La *tabla 2.1* muestra la comparación de resultados de los seis muros seleccionados en la dirección corta. De acuerdo con la planta de muros mostrada en la *figura 2.2.lzq*, se establece una nomenclatura de identificación para cada muro analizado. Por ejemplo, tomemos el muro 1FH-N2, el muro localizado en el eje 1 y entre los ejes F y H, mientras que el segundo término determina el nivel del edificio en donde se encuentra el muro, N2 en el segundo nivel.

Tabla 2.2 Cortantes Edificio A, LT* versus BR*, en la dirección larga

No.	Muro	Longitud de muro (m)	Cortante Promedio (ton/m)					
			LT		BR		COCIENTE	
			GRAV	LAT	GRAV	LAT	GRAV LT/BR	LAT LT/BR
7	A67-N1	2.47	-2.10	-4.07	-0.10	-0.09	21.00	45.22
	A67-N2	2.47	-0.65	-3.07	-0.07	-0.05	9.29	61.40
	A67-N3	2.47	-0.56	-2.98	-0.20	-0.20	2.80	14.90
8	C23-N1	3.20	-1.70	-1.45	-0.25	-0.04	6.80	36.25
	C23-N2	3.20	-1.71	-2.82	-0.39	-0.43	4.38	6.56
	C23-N3	3.20	-1.47	-1.68	-0.40	-0.63	3.68	2.67
9	D23-N1	3.20	-3.54	-4.02	-0.18	-0.18	19.67	22.33
	D23-N2	3.20	-2.54	-3.26	-0.25	-0.30	10.16	10.87
	D23-N3	3.20	-1.93	-3.27	-0.33	-0.34	5.85	9.62
10	F12-N1	1.00	-6.00	-5.98	-0.20	-1.12	30.00	5.34
	F12-N2	1.00	-3.68	-4.11	-0.39	-1.32	9.44	3.11
	F12-N3	1.00	-2.56	-3.06	-0.53	-1.33	4.83	2.30
11	H23-N1	3.20	-3.61	-3.87	-0.18	-0.13	20.06	29.77
	H23-N2	3.20	-2.40	-3.16	-0.26	-0.22	9.23	14.36
	H23-N3	3.20	-1.89	-2.68	-0.37	-0.32	5.11	8.38
12	K78-N1	2.58	2.18	5.25	0.09	1.33	24.22	3.95
	K78-N2	2.58	0.57	4.59	-0.04	2.19	14.25	2.10
	K78-N3	2.58	0.40	4.43	0.07	2.59	5.71	1.71

* LT (Edificio Real con losa de transferencia), BR (muros apoyados en base rígida)

** GRAV (Carga gravitacional mayorada), LAT(Combinación de Carga lateral más crítica)

En las tablas 2.1 y 2.2 se presenta la comparación de los cortantes que se generan en los muros en ambos sistemas. Como un indicativo de las diferencias en las últimas dos columnas de dichas tablas se muestra el cociente de los valores encontrados en el edificio real y los valores determinados para el edificio modificado cuyos muros se apoyan sobre base indeformable. Se observa una gran diferencia entre uno y otro sistema; de acuerdo a los cocientes el sistema de losa de transferencia genera cortantes mucho mayores a los que se dan en el sistema sobre base rígida

Además de lo anterior es de notarse que la influencia en cortantes no se ve limitada al primer nivel sino, que es significativa al menos en dos niveles más, tanto para carga vertical como lateral.

Sin embargo, un punto que debe destacarse es la diferencia entre los valores ante carga gravitacional. En diseños convencionales, raras veces se diseña para que los muros estén sometidos a cortantes elevados solo por carga vertical. De acuerdo a lo anterior, la generación de cortantes elevados en los muros debido únicamente a carga vertical, se le atribuye principalmente a las deformaciones o deflexiones que se producen en la losa y vigas.

El problema se presenta cuando se aplica la carga lateral, pues gran parte de la resistencia cortante del muro ya ha sido tomada o excedida, como se verá en el *capítulo 3*, solo por carga vertical, dejando muy poco margen para que el muro pueda soportar el cortante provocado por carga lateral.

2.2.1.3 CORTANTES MÁXIMOS PERMISIBLES

Las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTCM-2004) proponen una expresión para la resistencia a cortante de muros de mampostería; sin embargo, en esa misma ecuación se limita dicha resistencia a un valor máximo permisible dado por el término derecho de la *ecuación 2.1*.

$$V_{mR} = F_R(0.5v_R^*A_T + 0.30P) \leq 1.5F_Rv_R^*A_T \quad (2.1)$$

Donde:

F_R = Factor de reduccion de la resistencia,

v_m^* = Resistencia a la compresion diagonal de la mamposteria

A_T = Area transversal del muro incluyendo los castillos

P = Carga vertical sobre el muro, positiva en compresion

Para analizar los resultados obtenidos en las tablas 2.1 y 2.2 y verificar que muros se encuentran cerca o sobrepasan el límite permisible de cortante se utilizara el lado derecho de la *ecuación 2.1*; en donde obtendrá un cortante máximo por unidad de longitud. Considerando la resistencia a la compresión diagonal $v_R^* = 3 \frac{kg}{cm^2}$, $F_R = 0.70$ y el espesor t de muro de 15 centímetros, se tiene que el cortante máximo permisible por unidad de longitud que puede soportar cualquier muro de mampostería en el edificio es:

$$V_{maxperm} = 1.5F_Rv_R^*t = 1.5 \times 0.70 \times 3 \times 15 = 47.25 \frac{kg}{cm} = 4.725 \text{ ton/m} \quad (2.2)$$

Comparando el valor obtenido en la *ecuación 2.2* con los mostrados en las tablas 2.1 y 2.2, para el edificio sobre base rígida (BR), se observa que los cortantes de todos los muros del edificio

son menores que 4.725 ton/m. Por tanto, ningún muro del modelo sobre base rígida rebasa el máximo permisible de cortante según la normativa.

Ahora bien, si se contrasta el valor máximo permisible de cortante de la ecuación 2.2 con los generados en el edificio real (LT) ante carga vertical se encuentra que dos muros sobrepasan tal valor y otros seis se encuentran cercanos al límite. Por otra parte, si se comparan los valores bajo carga lateral se obtiene que el 28% de los muros rebasen el cortante máximo permisible, mientras que el 34% se encuentran al límite.

Los porcentajes del párrafo anterior, que de por sí ya son elevados, podrían incrementarse aún más si se comparan con la resistencia a cortante real del muro en donde se debe considerar la carga vertical sobre el mismo. Este aspecto se ve con más detalle en el *capítulo 3*.

2.2.2 EDIFICIO B

Este edificio tiene seis niveles sobre la losa de transferencia, bajo esta se encuentran dos sótanos.. Su cimentación se construyó a base de contratraveses con losa plana. El área construida en los niveles tipo es de 26 m x 14.5 m, que corresponde a una superficie de 377 m².

Además, hay muros de concreto reforzado en los elevadores, desde el estacionamiento inferior hasta la azotea. Existen otros tres muros de concreto reforzado, de aproximadamente 2.50 m en la dirección corta en los ejes D, F y H, pero desde el nivel 1.40 (*Figura 2.3b*), a partir del cual se desplantaron los niveles superiores del edificio con muros de concreto reforzado y de mampostería sobre la losa plana, generando el llamado sistema con losa de transferencia.

El problema que existe es que algunos muros de concreto y otros de mampostería no coinciden con los ejes de las columnas. Los muros de mampostería se prolongan desde la losa de cimentación y hasta la azotea en el eje 1; además son los elementos laterales resistentes principales a partir del nivel 0.40, junto con los muros de concreto reforzado

Tanto la losa de transferencia como los entrepisos de los sótanos, son losas planas aligeradas, de espesores de 30 y 40 centímetros; mientras que los niveles hacia arriba son de vigueta y bovedilla de 25 cm de espesor. La cimentación se resolvió con una losa de 30 cm de espesor con una retícula de contratraveses de 80 cm de peralte y 40 cm de ancho.

En cuanto a su Configuración Estructural, se puede afirmar de que se trata de un edificio altamente irregular, en rigidez y resistencia, tanto en elevación como en planta, lo que requiere de análisis detallados (Gómez Soberón et al. 2010).

2.2.2.1 ANÁLISIS DEL EDIFICIO B

De acuerdo a Gómez Soberón y otros (2010), se realizó un análisis completo a partir de los planos obtenidos. Para este análisis se utilizó el programa ETABS9. En la figura 2.4 se muestra el modelo de la estructura, el cual se analizó para siete distintas combinaciones de cargas estáticas verticales y horizontales por sismo; además de otros dos casos de análisis dinámico. Se usó el espectro sísmico correspondiente a la zona III-d, y se usó un factor de comportamiento sísmico $Q=1.4$, el cual está afectado por la alta irregularidad del inmueble. Se tomaron las combinaciones de carga comunes a la regla de combinación del 30%.

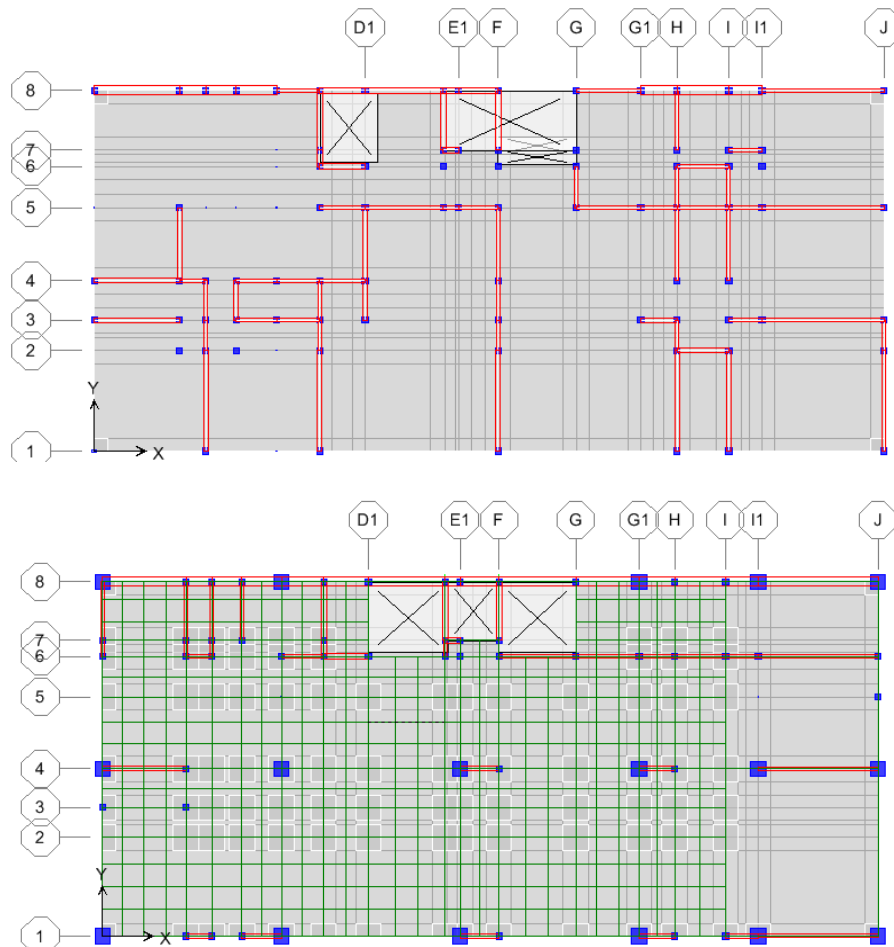


Figura 2.3 a) Distribución de muros sobre losa de transferencia Edificio B, b) Piso de Transferencia

Se detectó que, debido a la excesiva irregularidad en planta y elevación, existe una componente muy alta de vibración torsional en los primeros modos de vibrar. De la revisión de los requisitos de regularidad de la sección 6 de las NTC para diseño por sismo (NTCS-04), se verificó que no cumple con cuatro de las once condiciones estipuladas (1, 4, 10 y 11).

Este edificio se considera altamente irregular, pues además, tiene una excentricidad calculada, e_s de 30% en la dirección corta, por lo que se aplica un factor de 0.7 al coeficiente Q' . Para análisis en la dirección larga, la excentricidad calculada e_y de 3.94 m, representa más del 30% de la dimensión perpendicular; mientras que en la dirección corta e_x no excede el 10%.

Se hizo una revisión de los desplazamientos laterales de la estructura y de la resistencia de los diferentes elementos estructurales. Se concluyó que el edificio no presenta problemas serios en cuanto a desplazamientos laterales y distorsiones de entrepiso.

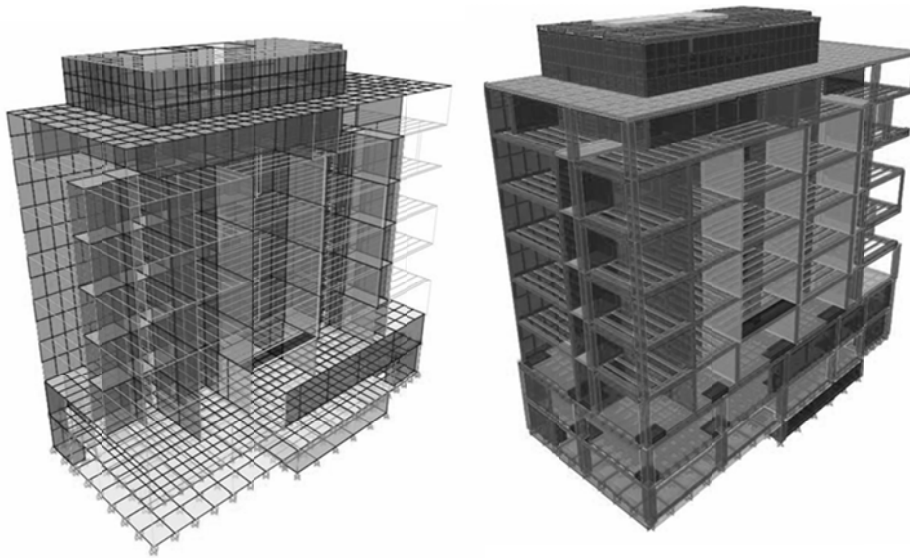


Figura 2.4 Edificio B

En cuanto a la resistencia de los elementos estructurales, el principal problema detectado se deriva de la interrupción de los muros estructurales de los entrepisos superiores, los cuales ya no se continúan en los dos niveles inferiores, ni tampoco sus ejes coinciden con los ejes que forman las columnas en estos dos niveles.

Debido a la falta de continuidad hasta la base, de muros de mampostería y de muros de concreto reforzado (sobre todo de los muros de los ejes C, D, F, y H); y también a que los muros de concreto de la zona de elevador no soportan cargas axiales, se encontraron en el análisis valores muy altos de fuerza cortante en los muros de concreto y de mampostería de ambas direcciones que descansan directamente sobre la “losa de transferencia”. Estos valores exceden las resistencias que pueden proporcionar esos muros. Lo anterior confirma que el edificio no tiene la capacidad al cortante de entrepiso en el entrepiso crítico.

En la combinación por carga vertical, se observó que debido a que los muros de concreto de los ejes D, F y H, descansan directamente sobre una losa de concreto (*losa transfer*), los

desplazamientos verticales de la losa que se obtienen bajo estos muros son de menos de 1 mm. Aun cuando, estos valores generan altas fuerzas cortantes en esos muros por carga vertical, lo que no sucedería si descansaran directamente en base rígida o ,al menos, si coincidieran sus ejes con los ejes que forman las columnas en los dos sótanos inferiores.

Los problemas estructurales detectados del edificio B se acentuaron debido a la alta irregularidad del edificio, además de las demandas altas debidas al sistema de piso En un buen diseño de un edificio con losa de transferencia se deben evitar grandes excentricidades respecto a la distribución de muros sobre la losa de transferencia, además se debe procurar en lo posible de que los muros coincidan con los ejes de las vigas del piso de transferencia sean estas principales o secundarias, al mismo tiempo se debe tratar de hacer buena distribución de los elementos que aportan la rigidez lateral del edificio para evitar torsiones excesivas.

2.3 DISCUSIÓN

De acuerdo a los resultados de los análisis de los dos edificios mostrados en este capítulo se pueden señalar algunas situaciones comunes detectadas en los sistemas con piso de transferencia:

- 1) En la condición de carga vertical, se presentan fuerzas cortantes elevadas en los muros de los primeros 3 entrepisos sobre el piso de transferencia debido a la deflexión de las losas y vigas secundarias.
- 2) Al considerar carga vertical y lateral en el análisis, se presentan fuerzas cortantes excesivas en algunos muros de los 3 primeros entrepisos sobre el piso de transferencia, que sobrepasan las resistencias de diseño.
- 3) Al dividir las fuerzas cortantes de los muros de los edificios sobre losas de transferencia entre las calculadas en muros de modelos sobre base rígida, se llegan a encontrar valores hasta de 5 veces (en muros que exceden su capacidad resistente).

En vista de la poca información sobre el diseño y comportamiento de edificios estructurados con losas de transferencia existen una gran cantidad de variables que se deben considerar para el buen desempeño de la estructura, como el tipo de losa utilizada (maciza, aligerada, losacero), posicionamiento de los muros que cargan sobre la losa, anclaje losa-muro, excentricidades en la distribución de muros entre otros. Se debe de procurar eliminar incertidumbres de diseño de tal forma de generar estructuras seguras y funcionales.

En esta tesis se trata solo sobre el estudio de un sistema en especial, aquel relacionado con el sistema del edificio A, es decir, losas apoyadas perimetralmente. En investigaciones futuras se podrán incluir otro tipo de sistemas.

CAPÍTULO 3

Análisis paramétrico para la evaluación del cortante en muros sobre pisos de transferencia

3.1 INTRODUCCIÓN

En el *Capítulo 2* se mostraron algunos resultados sobresalientes en el análisis de edificios reales estructurados con losa de transferencia construidos en la Ciudad de México, en donde fue posible identificar los diferentes problemas que presentan los muros cuando transmiten su carga directamente a un piso de transferencia.

En el presente capítulo se realiza un análisis paramétrico de modelos de edificios ficticios, con el objetivo de hacer evidentes las implicaciones que conlleva tener un piso de transferencia o, más específicamente su impacto en el comportamiento de los muros de carga en el primer nivel sobre la losa de transferencia.

3.2 ALCANCE DE LA EVALUACIÓN PARAMÉTRICA

Como se mencionó en el *Capítulo 1*, un edificio típico estructurado con losa de transferencia está conformado por una estructura inferior la cual está compuesta por marcos resistentes a momento, que pueden ser de concreto o de acero, comúnmente de 1 a tres niveles y que usualmente son utilizados como estacionamientos vehiculares. Sobre este sistema inferior se construye otra estructura intermedia, que corresponde al piso de transferencia, finalmente, el cuerpo superior del edificio conformado por muros de mampostería, concreto o una combinación de ambos, en la mayoría de los casos de 4 a 7 niveles sobre la losa de transferencia.

El estudio de este capítulo se limita al análisis de una losa de transferencia del tipo perimetralmente apoyada con vigas.

Para determinar el impacto de la losa de transferencia sobre los muros de carga del primer nivel se utilizan como parámetros de evaluación, los cortantes de algunos muros del primer nivel de un edificio ficticio, con una planta de distribución de muros típica de un edificio de apartamentos.

Se identifican, tres muros, cada uno con características particulares de interés para este estudio, y se determinaron los cortantes que se generan en la base de dichos muros,

provocados por carga gravitacional y por carga lateral, para luego ser comparados con los correspondientes a otro edificio cuya única diferencia radica en que los muros de la planta baja están apoyados sobre base rígida, es decir se suprimieron en el los marcos momento - resistentes.

3.3. PARÁMETROS CONSIDERADOS PARA EL ANÁLISIS

Para este estudio se decidió variar algunos parámetros que, aparentemente, tienen mayor efecto en la respuesta de un muro apoyado sobre una losa de transferencia perimetralmente apoyada. Estos parámetros son:

- El espesor de la losa
- El número de niveles sobre la losa de transferencia
- La longitud del claro entre columnas
- El tipo de apoyo de los muros del primer nivel (sobre losa de transferencia y sobre la base rígida)

Respecto a los espesores de los paneles de losa, se utilizaron tres valores, 10, 12 y 15 cm, con dos distintas longitudes de claro entre columnas, de cuatro y ocho m. Se utilizó la misma distribución de muros con siete y cinco niveles sobre la losa de transferencia, procurando tener densidades de muros similares en ambos sentidos de análisis. Además, se estudiaron dos modelos sobre base rígida, de 5 y 7 niveles, con la misma distribución de muros, cargas y materiales que los modelos de losa de transferencia.

Los modelos sobre base rígida, en los cuales se han eliminado los dos niveles inferiores (los marcos de concreto resistentes a momento), sirven para contrastar las diferencias existentes en las sollicitaciones que se presentan en los cortantes de los muros del primer nivel entre uno y otro sistema.

Es necesario aclarar que se estudian exclusivamente algunos muros de la planta, y no la losa en sí. Esto debido a que los programas comerciales de diseño no ofrecen herramientas detalladas del comportamiento no lineal de losas macizas. Por tal razón en los capítulos 5 y 6 se estudian con mayor detalle el sistema losa-muro en su comportamiento no lineal.

La *figura 3.1* muestra, en resumen, los modelos estudiados en este capítulo según los parámetros mencionados. Se definió un total de doce modelos para losa de transferencia y dos modelos sobre base rígida dando un total de catorce, todos ellos analizados con el programa ETABS.

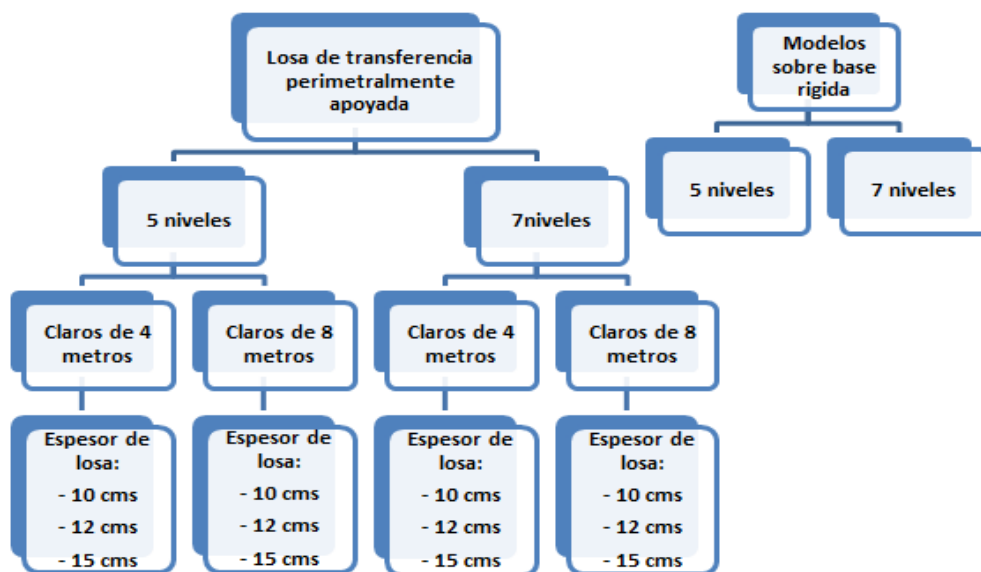


Figura 3.1 Parámetros considerados y modelos realizados

3.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS DE EDIFICIOS CON LOSA DE TRANSFERENCIA

En esta sección se detallan sus características principales tales como la distribución de los muros en la planta, las propiedades de los materiales asignados, las cargas aplicadas, la identificación de cada modelo entre otros.

3.4.1 PLANTA DE DISTRIBUCIÓN DE MUROS PROPUESTA

Para todos los modelos, de cinco y siete niveles, de losa de transferencia y con base rígida, se utilizó la misma planta de distribución de muros, tal como se muestra en la *figura 3.2*. La planta de muros es mixta, en el sentido que se tienen muros de mampostería y de concreto; estos últimos están ubicados en los bordes del edificio y, a diferencia de los muros de mampostería, tienen continuidad hasta la planta baja. Además, sirven para proporcionarle rigidez lateral a la estructura.

Como se observa en la *figura 3.2*, la planta de los dos pisos inferiores, compuestos por marcos de concreto resistentes a momento, es bastante regular, en donde la losa de transferencia tiene 16 paneles cuadrados de cuatro por cuatro metros, transmitiendo la carga de los niveles superiores a través de vigas perimetrales y, después a las columnas espaciadas a cada cuatro metros.

Capítulo 3: Análisis paramétrico para la evaluación del cortante en muros de carga sobre pisos de transferencia
Edificios Estructurados con Losas de Transferencia

En los modelos con claros de ocho metros se eliminan cuatro columnas internas, como se aprecia en la figura 3.2.der. Sin embargo, en estos modelos fue necesario aumentar el tamaño de los elementos resistentes de los marcos de concreto (vigas principales y secundarias y columnas), debido a que cada elemento posee una mayor área tributaria. En la *figura 3.3* se presenta una vista de dos de los modelos evaluados de cinco niveles; a la izquierda, el modelo de losa de transferencia de 5 niveles sobre el piso de transferencia, mientras que, a la derecha se muestra el modelo sobre base rígida de 5 niveles.

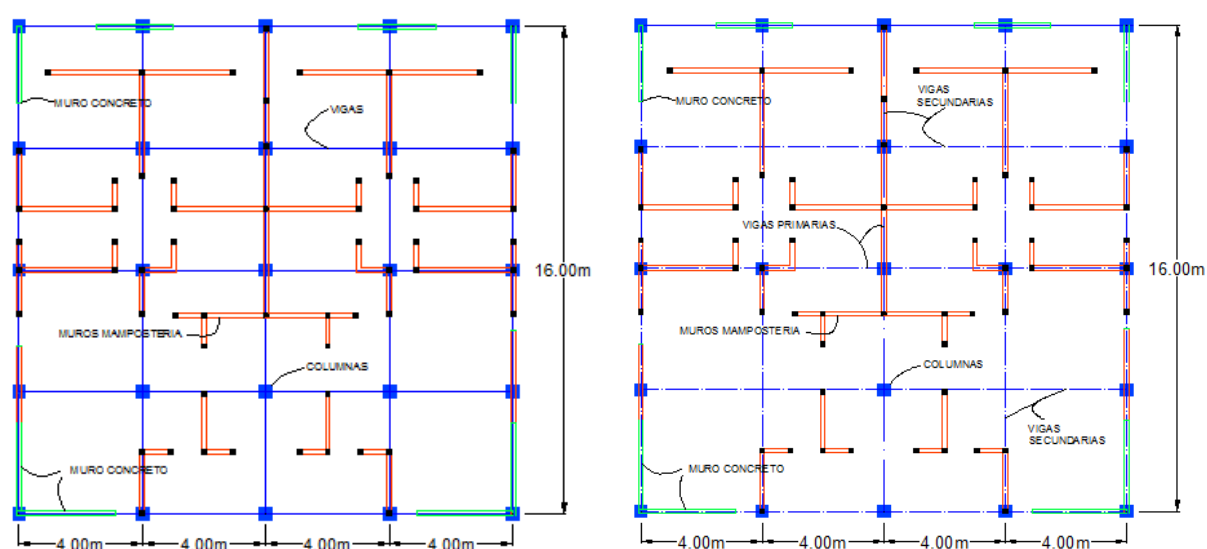


Figura 3.2 Plantas superpuestas de losa de transferencia y planta de distribución de muros. Claros de 4 mts. (Izq.), Claro de 8 mts. (Der.)

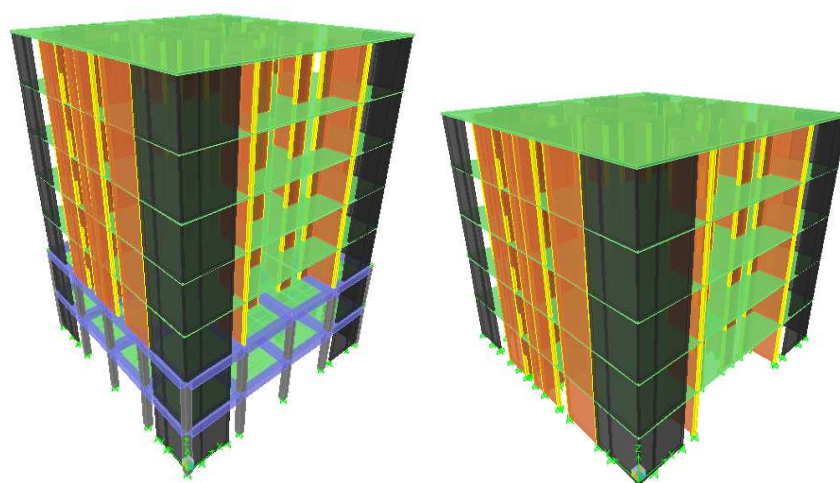


Figura 3.3 Vista del modelo de 5 niveles de losa de transferencia (Izq.), y sobre base rígida (Der.)

El parámetro a estudiar en los muros es el cortante generado en los muros del primer nivel de todos los modelos (de losa de transferencia y de base rígida). Para ello, se eligieron tres muros del primer nivel (*figura 3.4*). El muro *M1* es de mampostería y se encuentra orientado en la dirección Y, con una longitud de 2 m y tiene un extremo apoyado sobre una viga y el otro termina justo en el centro del claro del panel. El muro *M2* también de mampostería y orientado en la dirección X, tiene 3 m de longitud; un extremo se apoya en una viga y el otro termina dentro del panel. El muro *M3* es de mampostería y se encuentra orientado en la dirección Y, con una longitud de 1.50 m y tiene un extremo apoyado sobre una viga y el otro termina dentro del panel.

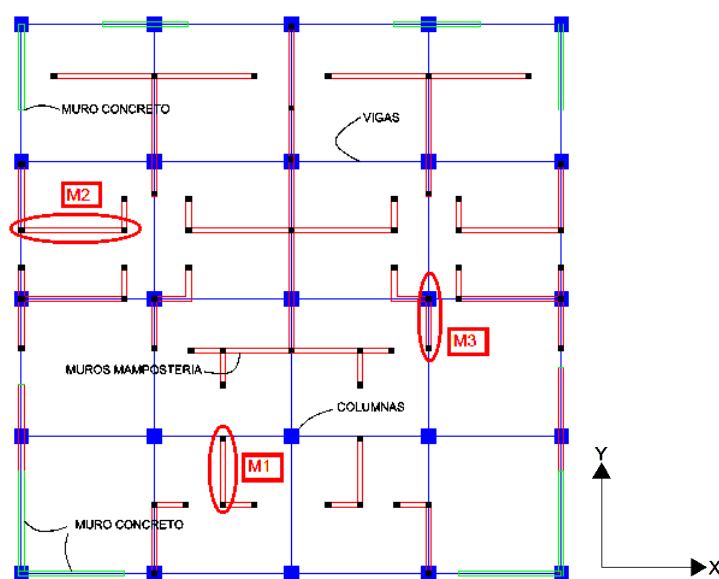


Figura 3.4 Muros analizados en los análisis

A diferencia de los muros *M1* y *M2*, el *M3* está apoyado sobre una viga, tiene una longitud de 1.50 metros y también es de mampostería. El muro *M3* se incluye para estudiar el caso de un muro apoyado en toda su longitud, sobre una viga principal en el caso de los modelos de cuatro metros de claro y sobre una viga secundaria para los de 8 metros de luz entre columnas.

3.4.2 MATERIALES

Los materiales asignados en los modelos llevados a cabo son el concreto, mampostería y acero de refuerzo. Se utilizó un peso volumétrico de 2400 kgf/m³, para el concreto reforzado y una resistencia a la compresión de 250 kg/cm², excepto en los castillos donde se usó $f'_c = 150$ kg/cm². El módulo de elasticidad se definió de acuerdo a la fórmula propuesta por la NTC-2004. En la mampostería se usó una resistencia a la compresión de 50 kg/cm² y un módulo de elasticidad de 21,000 kg/cm². Para el acero de refuerzo se supuso $f_y = 4200$ kg/cm².

3.4.3 IDENTIFICACIÓN DE LOS MODELOS EVALUADOS

Es necesario identificar cada modelo de acuerdo a sus características. Para ello se propone esta nomenclatura:

$$nn_m_e$$

Dónde:

nn = número de niveles sobre la losa de transferencia o número total de niveles para los modelos sobre base rígida.

m = longitud del claro entre columnas

e = espesor de la losa perimetralmente apoyada

En lo que concierne a la nomenclatura utilizada para los dos modelos sobre base rígida, ésta se presenta en la *tabla 3.1* junto con las características generales de cada modelo.

Tabla 3.1 Identificación de los modelos

Modelo	Número de niveles*	Longitud del claro (m)	Espesor de losa (cm)	Tipo de apoyo de los muros**
5_4_10	5	4	10	LT
5_4_12	5	4	12	LT
5_4_15	5	4	15	LT
7_4_10	7	4	10	LT
7_4_12	7	4	12	LT
7_4_15	7	4	15	LT
5_8_10	5	8	10	LT
5_8_12	5	8	12	LT
5_8_15	5	8	15	LT
7_8_10	7	8	10	LT
7_8_12	7	8	12	LT
7_8_15	7	8	15	LT
BR_5	5	----	----	BR
BR_7	7	----	----	BR

* En caso de los modelos con losa de transferencia los números de niveles se refieren a los que están sobre dicha losa

** LT (apoyados sobre losa de transferencia), BR (apoyados sobre base rígida)

3.4.4 DIMENSIONES DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES

A los muros de mampostería se asignó un espesor de 12 cm, mientras que a los de concreto 15 centímetros. Los muros de mampostería son confinados por castillos de 15x15 cm ubicados de

acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería del Distrito Federal.

Respecto a las vigas y columnas de los marcos resistentes a momento en los modelos con losa de transferencia se utilizaron 2 juegos de dimensiones, según los claros libres entre columnas. En los edificios con claros de 4 m solo existen dos tipos de elementos: columnas y vigas principales, las primeras de 40x40 cm y las segundas de 40x60 cm.

En los edificios con claros de 8 m fue necesario utilizar vigas secundarias según muestra la *figura 3.2.Der*. En esos modelos los elementos principales debieron ser robustecidos para soportar las cargas verticales y laterales. Las columnas son de 60x60 cm, mientras que las vigas principales de 40x90 cm y las vigas secundarias de 30x60 cm.

3.4.5 CARGAS APLICADAS A LOS MODELOS

La carga muerta la evalúa directamente el programa; la carga viva máxima se consideró de 170 kg/m² y la carga viva instantánea de 90 kg/m², valores que corresponden al diseño de edificios destinados a vivienda, según los establecen las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de Edificaciones. Se incluyó una sobrecarga de 120 kg/m² que incluye el firme y piso acabado de cada losa.

Se definieron cargas laterales estáticas por sismo en las dos direcciones principales, con base en un espectro de diseño de la colonia Roma de la Ciudad de México con una reducción por ductilidad de 2 ($Q=2$).

Cada modelo fue analizado con las combinaciones de carga que usualmente se utilizan en el análisis estructural de edificios, que incluyen combinaciones ante carga lateral y carga vertical. Los valores de los cortantes en el muro que se mencionan en este capítulo son el producto de la combinación que produce las fuerzas cortantes mayores.

Cuando se analizan los cortantes en los muros ante carga vertical en los modelos con losa de transferencia fue utilizada la combinación en donde todas las cargas verticales (viva, muerta y sobrecarga) fueron multiplicadas por un factor de mayoración de 1.4.

Igualmente, en los modelos sobre base rígida para determinar la carga vertical en los muros analizados se utilizó la misma combinación (viva, muerta y sobrecarga) multiplicadas por un factor de mayoración de 1.4.

Lo mencionado en el párrafo anterior se tomó en cuenta debido a que, como se indican en la *ecuación 3.1* parte de la resistencia a cortante de un muro depende de que cantidad de carga vertical (P) que este soporta. Si aplicamos un factor de 1.4 para mayorar a dichas cargas verticales se podría tener resistencias cortantes teóricas mayores, que no reflejen la realidad en vista de que la mayor parte de la resistencia al cortante estaría siendo aportada por el hecho de tener una carga vertical de magnitud considerable y no por las propiedades inherentes al muro.

3.5 CORTANTES EN MUROS DE LOS MODELOS ESTUDIADOS

En esta sección se presentan los resultados del análisis de los modelos, en particular, de los cortantes en los muros del primer nivel de todos los modelos de edificios de la *tabla 3.1*. En esencia se realizan comparaciones de los cortantes en los muros de los edificios cuyos muros inferiores se apoyan sobre base rígida con los que descansan sobre la losa de transferencia.

3.5.1 RESISTENCIA AL CORTANTE DE LOS MUROS ANALIZADOS

Las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (*NTCM*) del Distrito Federal proponen que la fuerza cortante de diseño resistida por muros de mampostería confinada está dada por la siguiente expresión:

$$V_{mR} = F_R(0.5v_m^*A_T + 0.3P) \leq 1.5F_Rv_m^*A_T \quad (3.1)$$

Donde:

F_R = Factor de reducción de la resistencia

v_m^* = Resistencia a la Compresión diagonal de la mampostería

A_T = Área transversal del muro incluyendo los castillos

P = Carga vertical sobre el muro, positiva en compresión

Se tomó como 1 el factor de reducción de resistencia F_R en vista de que no es objeto de este capítulo el diseño de los muros del edificio sino, por el contrario, determinar los cortantes reales que se presenta, en los muros de estudio y, por consiguiente, la influencia de la losa de transferencia en los mismo.

3.5.2 EDIFICIOS SOBRE BASE RÍGIDA

Se estudiaron dos modelos de edificios sobre base rígida, de cinco y siete niveles. Para el análisis de estos modelos se utilizó una planta con distribución de muros idéntica a la mostrada en la *figura 3.4* en donde también se muestran los muros que son objeto del análisis.

Capítulo 3: Análisis paramétrico para la evaluación del cortante en muros de carga sobre pisos de transferencia
Edificios Estructurados con Losas de Transferencia

La *tabla 3.2* muestra los resultados del análisis de ambos edificios, se indican los cortantes en los muros del primer nivel ante carga gravitacional y ante carga lateral.

Se debe mencionar que, contrario a lo que pasa con los cortantes provocados por carga lateral en este tipo de edificios los cortantes producidos por carga vertical no son de mucho interés, en vista de que estos son casi nulos; sin embargo y como se verá más adelante, serán útiles para hacer ciertas comparaciones con los sistemas de losa de transferencia.

Tabla 3.2 Cortante en los muros sobre base rígida, para carga gravitacional y lateral

	M1		M2		M3	
Modelo	Gravit. (ton)	Lateral (ton)	Gravit. (ton)	Lateral (ton)	Gravit. (ton)	Lateral (ton)
BR_5	0.01	2.29	0.03	7.87	0.01	2.47
BR_7	0.06	3.03	0.04	8.40	0.02	2.55

La penúltima columna de las tablas 3.3 y 3.4 indica los valores teóricos de resistencia a cortante de los muros analizados, en donde se incluye la carga vertical sobre el muro de mampostería obtenida de los análisis. Se consideró una resistencia a compresión diagonal de 3 kg/cm². En la última columna de las tablas mencionadas se indica el cortante calculado en la base del muro de los modelos de edificios apoyados sobre base rígida.

Tabla 3.3 Resistencia cortante teórica y cortantes en el modelos de BR_5

Muro	v*m (kg/cm ²)	L (cm)	t (cm)	At (cm ²)	P (kg)	VmR (Ton)	V modelos (Ton)
M1	3.00	200	12	2,400	10,511.19	6.75	2.29
M2	3.00	300	12	3,600	15,410.33	10.02	7.87
M3	3.00	150	12	1,800	8,650.33	5.30	2.47

Tabla 3.4 Resistencia cortante teórica y cortantes en el modelos de BR_7

Muro	v*m (kg/cm ²)	L (cm)	t (cm)	At (cm ²)	P (kg)	VmR (Ton)	V modelos (Ton)
M1	3.00	200	12	2,400	14,681.25	8.00	3.03
M2	3.00	300	12	3,600	21,460.56	11.84	8.40
M3	3.00	150	12	1,800	12,063.89	6.32	2.55

De las tablas 3.3 y 3.4 se puede observar que al comparar los cortantes resistentes con los obtenidos de los modelos, los muros de los edificios analizados pasan por cortante. Incluso si a los valores teóricos se les aplicara el factor de resistencia F_R de 0.70 (que proponen las NTCM), la mayoría de los muros tendrían suficiente resistencia a fuerza cortante.

3.5.3 EDIFICIOS CON LOSA DE TRANSFERENCIA

En esta sección se presentan los resultados de los modelos con muros sobre una losa de transferencia cuyos paneles tiene claros entre ejes de cuatro m. Igualmente se obtuvieron los valores para carga gravitacional y para carga lateral. En este caso se mantuvo fija la longitud del claro de losa y se variaron otros parámetros como el espesor de la losa y el número de niveles sobre la misma. Para hacer comparaciones válidas, a todos los modelos con claros de cuatro m se les aplicó las mismas cargas laterales y verticales, y las mismas combinaciones de carga, además con las mismas dimensiones de los elementos en los marcos resistentes a momento, así como los mismos espesores de muros.

La tabla 3.5 resume los resultados para los tres muros analizados en los seis modelos con claros de 4 m. Como principal punto a resaltar es que se observa un incremento significativo del cortante solo por carga gravitacional en contraste con los obtenidos en los modelos sobre base rígida, tal como lo muestra la *tabla 3.4*.

Tabla 3.5 Cortantes en los muros para claros de losa de 4 metros

	M1		M2		M3	
Modelo	Gravit. (ton)	Lateral (ton)	Gravit. (ton)	Lateral (ton)	Gravit. (ton)	Lateral (ton)
5_4_10	8.19	9.61	7.11	19.19	0.70	0.93
5_4_12	7.05	7.77	6.65	15.73	0.76	0.98
5_4_15	5.34	6.14	5.93	12.04	0.82	1.05
7_4_10	13.33	13.81	9.58	36.73	0.75	0.97
7_4_12	8.32	11.20	8.88	31.03	0.86	1.02
7_4_15	6.47	9.96	8.00	22.35	0.90	1.09

De igual manera, ante carga lateral los cortantes se ven incrementados en gran medida con respecto a los que se presentan en la *tabla 3.4*, a excepción del muro M3 que tiene la particularidad que toda su longitud se encuentra apoyada sobre una viga principal.

Respecto a los cortantes por carga vertical y lateral, se percibe una tendencia a que estos disminuya a medida se aumenta el espesor de la losa del piso de transferencia, mientras que por otra parte es lógico pensar que estos aumentarían en la medida que el edificio vaya creciendo en niveles.

La *tabla 3.6* muestra los cortantes para los modelos con claros de ocho metros entre columnas de acuerdo a la planta de distribución en la figura 3.2.Der. En relación con el muro M1, los resultados presentados en la *tabla 3.6* no indican diferencias significativas con respecto a la *tabla 3.6*, sin embargo se debe mencionar que en magnitud son mayores éstos últimos.

Con el muro *M2* ocurre lo mismo que con *M1*, es decir, valores parecidos en ambas tablas pero con magnitudes de los cortantes un tanto mayores con respecto a los modelos con claros de cuatro metros, especialmente en los edificios de 5 niveles.

Tabla 3.6 Cortantes en los muros para claros de losa de 8 metros

	M1		M2		M3	
Modelo	Gravit. (ton)	Lateral (ton)	Gravit. (ton)	Lateral (ton)	Gravit. (ton)	Lateral (ton)
5_8_10	8.30	9.38	8.14	24.06	1.94	4.37
5_8_12	6.86	8.09	8.12	16.17	1.96	4.38
5_8_15	4.97	6.22	8.01	13.53	2.01	4.38
7_8_10	10.00	14.15	10.51	37.31	2.13	6.07
7_8_12	8.31	11.15	10.40	32.08	2.16	6.01
7_8_15	6.07	9.08	10.39	25.30	2.28	5.95

En la *figura 3.2* se muestra la diferencia entre la planta de la losa de transferencia de los edificios con claros de 4 y 8 m, en este último se han suprimidos cuatro columnas lo que convierte en vigas secundarias a todas aquellas que se apoyaban en dichas columnas.

El hecho de que estas vigas secundarias tengan una longitud de ocho metros provoca un aumento en las deflexiones verticales de la misma esto tiene como consecuencia lo que se aprecia en la *tabla 3.6* para el muro *M3*, un aumento notable en los cortantes tanto para carga vertical como lateral con respecto a lo mostrado en la *tabla 3.5* para dicho muro.

En la *tabla 3.5* se presentan los resultados para los edificios con claros de ocho metros, y se observa la misma tendencia, los cortantes generados en los muros son inversamente proporcionales al espesor de la losa de transferencia, pero directamente proporcionales al número de niveles con los que cuenta el edificio sobre la losa de transferencia.

3.6 COMPARACIÓN GENERAL EDIFICIOS SOBRE BASE RÍGIDA Y EDIFICIOS CON LOSA DE TRANSFERENCIA

En las tablas 3.7 a 3.9 se realiza una comparación general entre los resultados obtenidos para los edificios apoyados sobre base rígida y los que tiene sus muros sobre la losa de transferencia. Es evidente la diferencia entre uno y otro sistema, y especialmente el contraste entre las fuerzas cortantes que se generan en los muros del primer nivel solo ante carga vertical en los sistemas de losa de transferencia.

Tabla 3.7 Comparación Cortantes Muro M1

Modelo	Gravitacional		Lateral	
	Base Rígida	LT	Base Rígida	LT
5_4_10	0.01	8.19	2.29	9.61
5_4_12	0.01	7.05	2.29	7.77
5_4_15	0.01	5.34	2.29	6.14
7_4_10	0.06	13.33	3.03	13.81
7_4_12	0.06	8.32	3.03	11.20
7_4_15	0.06	6.47	3.03	9.96
5_8_10	0.01	8.30	2.29	9.38
5_8_12	0.01	6.86	2.29	8.09
5_8_15	0.01	4.97	2.29	6.22
7_8_10	0.06	10.00	3.03	14.15
7_8_12	0.06	8.31	3.03	11.15
7_8_15	0.06	6.07	3.03	9.08

* LT , Cortantes en los muros para los modelos con losa de transferencia

De la *tabla 3.7* (resultados de *M1*) resulta interesante remarcar ciertos aspectos, en primer lugar se nota que el cortante producido por carga vertical en los muros sobre base rígida es depreciable, en cambio los cortantes del mismo muro pero apoyado sobre losa de transferencia en el 75% de los casos supera la resistencia a cortante que especifica las normas técnicas.

En segundo lugar en el caso particular del muro *M1* se ve un incremento en las fuerzas cortantes cuando la carga lateral es aplicada, sobrepasando en el 83% de los casos la resistencia a corte que especifican las NTCM-2004, en donde curiosamente los únicos dos casos en donde la resistencia a cortante se cumple es cuando se tienen losas de 15 cm de espesor.

El problema resulta un poco más evidente para el muro *M2*, la *tabla 3.8* muestra las cortantes para ambos sistemas estudiados. En este muro las diferencias en las cortantes tanto para carga lateral y vertical resultan contundentes.

Ante carga vertical todos los muros se encuentran al límite de su capacidad dejando muy poco margen de resistencia para soportar cargas laterales. Ante carga lateral ningún muro es capaz de cumplir con lo establecido en las normas siendo rebasados de su capacidad por un porcentaje considerable.

Tabla 3.8 Comparación Cortantes Muro M2

Modelo	Gravitacional		Lateral	
	Base Rígida	LT	Base Rígida	LT
5_4_10	0.03	7.11	7.87	19.19
5_4_12	0.03	6.65	7.87	15.73
5_4_15	0.03	5.93	7.87	12.04
7_4_10	0.05	9.58	8.40	36.73
7_4_12	0.05	8.88	8.40	31.03
7_4_15	0.05	8.00	8.40	22.35
5_8_10	0.03	8.14	7.87	24.06
5_8_12	0.03	8.12	7.87	16.17
5_8_15	0.03	8.01	7.87	13.53
7_8_10	0.05	10.40	8.40	37.31
7_8_12	0.05	10.76	8.40	32.08
7_8_15	0.05	10.40	8.40	25.30

* LT , Cortantes en los muros para los modelos con losa de transferencia

El muro M3 cuyo resultados se presentan en la *tabla 3.9* tiene la característica de que toda su longitud se encuentra apoyada en una viga primaria en los modelos con claros de cuatro metros y en una viga secundaria en los modelos de ocho metros, para el primer caso la rigidez de la viga primaria le ayuda a que dicho muro no experimente cortantes elevados.

Tabla 3.9 Comparación Cortantes Muro M3

Modelo	Gravitacional		Lateral	
	Base Rígida	LT	Base Rígida	LT
5_4_10	0.02	0.70	2.47	0.93
5_4_12	0.02	0.76	2.47	0.98
5_4_15	0.02	0.82	2.47	1.05
7_4_10	0.02	0.75	2.55	0.97
7_4_12	0.02	0.86	2.55	1.02
7_4_15	0.02	0.90	2.55	1.09
5_8_10	0.02	1.94	2.47	4.37
5_8_12	0.02	1.96	2.47	4.38
5_8_15	0.02	2.01	2.47	4.38
7_8_10	0.02	2.13	2.55	6.07
7_8_12	0.02	2.16	2.55	6.01
7_8_15	0.02	2.28	2.55	5.95

* LT , Cortantes en los muros para los modelos con losa de transferencia

Por otra parte cuando el muro está apoyado sobre una viga secundaria debido a las deflexiones que se dan en la viga en este, se presentan cortantes que superan por mucho su capacidad ante carga lateral y los valores llegan al límite ante carga vertical.

3.7 DISCUSIÓN

El principal punto de discusión radica en el hecho de que se ha demostrado que las cortantes en algunos muros sobre losas de transferencia se elevan en una forma considerable llegando en la mayor parte de los casos a superar la resistencia cortante establecida por las normas técnicas del Distrito Federal para estructuras de mampostería. En contraste con los muros apoyados sobre base rígida, los que sí cumplen con la resistencia especificada en la norma tanto para carga vertical como lateral.

En un piso de transferencia es relevante la rigidez del elemento estructural en el cual se apoyan los muros (losa o viga), ya que esta influye directamente en la magnitud de los cortantes que se dan en los muros especialmente ante carga vertical.

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede afirmar que el espesor de la losa sobre la cual se apoya el muro juega un papel relevante en los cortantes que se originan en los muros apoyados sobre la losa de transferencia, entre mayor sea este menos crítica será la condición del muro ante carga vertical y también ante carga lateral.

También, es importante destacar que el equilibrio general de la estructura se debe cumplir de tal forma que la sumatoria de los cortantes horizontales generados por la condición de carga vertical es cero, no así los esfuerzos en los muros como se verá más adelante en esta tesis. Asimismo, el cortante de entrepiso resultante de los cortantes producidos en los muros a causa de la carga lateral, siempre es igual a la carga lateral impuesta, es decir, siempre se cumple el equilibrio. De acuerdo a lo anterior, aunque en algunos muros el cortante se ve incrementado en otros disminuye. El problema es que en algunos muros cuando el cortante del se ve acrecentado supera la capacidad propia de diseño del muro.

Se debe mencionar que los resultados obtenidos para los cortantes en los muros por el programa computacional utilizado, ETABS; se consideran fiables en vista que se realizó una validación de un modelos en el programa SAP2000, obteniendo resultados casi idénticos. Además de lo anterior, el programa ETABS es ampliamente utilizado alrededor del mundo, en cálculo y diseño estructural.

CAPÍTULO 4

Propiedades de los modelos analizados con elementos finitos

4.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad se dispone de herramientas computacionales especializadas de análisis muy avanzadas y eficaces especialmente cuando se requiere incluir el comportamiento no lineal de los materiales, para observar el efecto que esto tiene en el comportamiento local y global de determinado elemento o conjunto de elementos que forman una estructura. De otra manera este estudio no podría ser realizado por su enorme complejidad matemática y de cálculo.

Debido a que uno de los objetivos de esta tesis es estudiar el comportamiento no lineal de los modelos de muros y losas, así como el del anclaje muro-losa, se utilizó el *ANSYS*, porque es un programa capaz de modelar en forma adecuada el intervalo no-lineal, en comparación con otros paquetes de análisis como el *SAP200*, *ETABS* o *SAFE*.

Sin embargo, como se verá más adelante, aunque estos programas son poderosos instrumentos de análisis, siempre es indispensable el buen criterio de quien hace uso de ellos y del conocimiento suficiente de las bondades y limitaciones que el programa de análisis posee, de esto depende, en gran medida, el provecho que se pueda obtener de él.

En este capítulo se indica el alcance de los análisis realizados, así como el procedimiento seguido para la obtención de los resultados. Además, se mencionan las bases teóricas y las consideraciones tomadas en cuenta para la generación de los modelos empleados, los que son presentados en los capítulos 5 y 6.

4.2 ALCANCE DEL MODELADO ANALÍTICO CON ELEMENTOS FINITOS

Uno de los objetivos principales de este capítulo es estudiar de manera analítica un modelo con elementos finitos usando *ANSYS*, que represente de la mejor manera posible un espécimen (*Fig. 4.3.a*) que será ensayado en el laboratorio de Estructuras de la UAM-Azcapotzalco, y cuyos detalles se describen más adelante (*Capítulo 7*). Pero además de ese modelo, se incluyen otros más que contemplan otras geometrías y dos tipos de materiales diferentes para el muro. Por tanto, como muestra la figura 4.3.a-d, se decidió evaluar cuatro geometrías diferentes. Con esto se pretende determinar curvas de capacidad de las losas, considerando el comportamiento

no lineal, bajo cargas verticales incrementadas monotónicamente, hasta que la losa falle o presente un daño considerable.

Por otra parte, interesa definir la relación de deformación losa-muro, es decir, la relación existente entre la deformación de la losa y el agrietamiento del muro, ya sea este de mampostería o de concreto. Esto es de gran importancia para evaluar las condiciones de servicio de este tipo de estructuras en vista de que se han observado agrietamientos excesivos en los muros de los primeros niveles sobre el piso de transferencia.

También es un objetivo de estudio de este trabajo el comportamiento del muro y de la losa de transferencia ante carga lateral. En este respecto aunque se han realizado innumerables estudios experimentales y teóricos de muros ante cargas laterales, todos estos se basan en suponer que el muro está apoyado en una base indeformable. Difiere respecto al presente estudio en que el muro se encuentra sobre una base flexible o deformable, lo que hace el problema más complejo.

Generalmente, cuando las losas son solicitadas por cargas laterales, las deformaciones dependen casi exclusivamente de la rigidez del diafragma. Sin embargo en este caso, además de la condición del diafragma, se tienen también importantes cargas y deformaciones que inducen los muros al apoyarse directamente sobre la losa. Esta condición puede generar, en ciertos casos, estados críticos de esfuerzos ante carga lateral. La *figura 4.1* muestra en forma esquemática los detalles de los modelos estudiados en donde se ha variado la longitud del muro así como también se han utilizado dos espesores de losa diferentes.

Se puede observar que la *figura 4.1* está dividida a la mitad, cortando en partes iguales la losa, el muro y los castillos; es decir, sólo se modeló la mitad con el fin principal de ahorrar tiempo computacional y facilitar la convergencia. Este factor es de vital importancia para modelos no lineales. Aplicando las restricciones correctas, este modelo conduce a los mismos resultados que si se usara la totalidad de los elementos.

Además, con el fin de tener puntos de comparación y realizar la evaluación del comportamiento de la losa de transferencia ante carga lateral, se han generado modelos no lineales de los muros sobre base rígida, tanto de concreto como mampostería, con las mismas características que los modelos de losa de transferencia. También, para el estudio de las losas exclusivamente bajo carga vertical, se ha estudiado un modelo no lineal de losa maciza convencional, sin muro sobre ella, con las mismas dimensiones y armado de refuerzo que las estudiadas para las losas de transferencia y cargada uniformemente en toda su área, con el propósito de llevar a cabo una comparación de resultados.

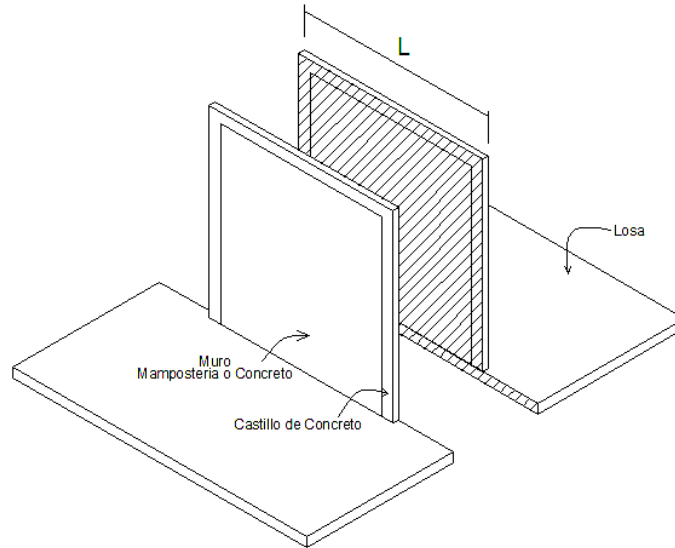


Figura 4.1 Esquema principal de los modelos de losa de transferencia y muro estudiados.

4.3 PROCEDIMIENTO PARA ELABORACIÓN DE MODELOS

En esta sección se describe con detalle el proceso de la generación de los modelos en *ANSYS* y su posterior pos-procesamiento de resultados. La *figura 4.2* muestra, en forma cronológica, el procedimiento que se utilizó para llevar a cabo el análisis de los diferentes modelos que se ejecutaron.

El primer paso consiste en realizar el dibujo del modelo en *3D* en *AutoCad*. Esta fase es compleja y tediosa en vista de que lo más recomendable es dibujar el mallado del modelo, de tal forma de que se puedan incluir todos los puntos donde se podrían presentar discontinuidades o errores como en esquinas, intersecciones de líneas, etcétera.



Figura 4.2 Esquema de la metodología aplicada

Se debe garantizar que el dibujo de las líneas del acero de refuerzo de la losa, castillos y dala empaten perfectamente con el mallado previamente dibujado; de otra manera y como se

explica más adelante se tendrían problemas al generar el mallado. El dibujo en *AutoCAD* se debe referenciar al sistema de coordenadas globales, esto también es de vital importancia.

Una vez que el dibujo de la malla de elementos y líneas de refuerzo está completo, se transforma a un archivo de extensión “.dxf” de *AutoCAD* para poder ser exportado por el programa *GiD*. En este paso con el programa *GiD*, se procede a generar los elementos y las conectividades de los mismos. aquí es importante que el dibujo previamente realizado y exportado de *AutoCAD* esté bien elaborado ya que, de lo contrario, el “*mesh*” no es generado correctamente. En tal caso se debe volver al dibujo de *AutoCAD* para corregir este problema.

Se debe mencionar que es muy común tener ese tipo de inconvenientes. Ya que el dibujo está correcto, se crean a través del *GiD* archivos de extensión “.msh”; tales archivos contienen las coordenadas globales de cada uno de los nodos y sus conectividades.

A esta altura del proceso ya se ha “fusionado” el concreto con el armado de refuerzo mediante un comando del *GiD* llamado “*collapse*” con el que se hacen coincidir exactamente los nodos del armado de refuerzo con los nodos del mallado del concreto.

El siguiente paso consiste en exportar los archivos con extensión “.msh” a un archivo de texto (.txt). En dicho archivo de texto se asignan las propiedades a los materiales del modelo utilizando y respetando el lenguaje de *ANSYS*.

A continuación y desde *ANSYS* se exporta el archivo “.txt” y se definen dentro del programa las propiedades no lineales de los materiales, así como las restricciones de movimiento y las cargas aplicadas al modelo. Posteriormente, se corre el programa, que en el caso no lineal puede tardar un tiempo considerable respecto a la opción lineal. Finalmente, el programa genera los resultados una vez que estos convergen. Después de ello se pasa a la etapa de interpretación de los resultados.

Es importante resaltar que la elaboración de este tipo de modelos requiere una gran cantidad de horas de trabajo, así como también de considerables recursos computacionales, en tiempo y capacidad, por tal motivo, se debe tener claro lo que se va a hacer y lo que se quiere obtener, así como poseer un buen criterio para la interpretación correcta de los resultados.

4.4 IDENTIFICACIÓN DE LOS MODELOS ESTUDIADOS

4.4.1 MODELOS DE LOSA DE TRANSFERENCIA

Para facilitar la interpretación de los resultados y la comparación de los modelos estudiados se propuso una nomenclatura para cada modelo basado en su geometría y en el tipo de materiales usados en el muro.

Las condiciones de carga aplicadas a los modelos serán las mismas para todos, y se describen en detalle en la sección 4.5.5.3 de este capítulo. Por tanto, la nomenclatura básica de los modelos utilizada está dada como sigue:

$$Mx_MatL_eC$$

Donde:

Mx = Número de Modelo

Mat = Material utilizado en el muro (Concreto = C, Mampostería = M)

L = Longitud del Muro, en metros

e = Espesor de la losa, en centímetros

C = Tipo de carga aplicada, *V* = vertical, *VL* = Vertical de servicio + Lateral

Por ejemplo, para el modelo de la *figura 4.3.a* y considerando un muro de concreto se tiene la siguiente nomenclatura *M1_C2.5_12V*, lo que indica que es el modelo 1, con muro de concreto de 2.50 metros de longitud y sobre una losa de 12 centímetros de espesor, analizado bajo carga vertical última. A continuación se presenta un resumen de los modelos de losas de transferencia analizados:

Tabla 4.1 Modelos de losa de transferencia realizados

Modelo	Concreto	Mampostería	Longitud Muro (m)	Espesor de Losa (cm)	Figura
M1_C2.5_12V	X		2.50	12	5.2.a
M2_M2.5_12V		X	2.50	12	5.2.a
M3_C3_12V	X		3.00	12	5.2.b
M4_M3_12V		X	3.00	12	5.2.b
M5_C3.75_12V	X		3.75	12	5.2.c
M6_M3.75_12V		X	3.75	12	5.2.c
M7_C3_13V	X		3.00	13	5.2.d
M7_M3_13V		X	3.00	13	5.2.d
M9_C2.5_12VL	X		2.50	12	5.2.a
M10_M2.5_12VL		X	2.50	12	5.2.a
M11_C3_12VL	X		3.00	12	5.2.b
M12_M3_12VL		X	3.00	12	5.2.b

M13_C3.75_12VL	X		3.75	12	5.2.c
M14_M3.75_12VL		X	3.75	12	5.2.c
M15_C3_13VL	X		3.00	13	5.2.d
M16_M3_13VL		X	3.00	13	5.2.d

4.4.1 MODELOS DE MURO SOBRE BASE RÍGIDA

Además de los 16 modelos de losa de transferencia que se describen en la *tabla 4.1* se estudiaron 6 modelos más con las mismas características, pero con la diferencia de que estos fueron desplantados sobre base rígida. Esto con el fin de realizar comparaciones en el comportamiento ante carga lateral de ambos sistemas. Las dimensiones de los muros analizados se pueden apreciar en la *figura 4.3*.

La nomenclatura utilizada para estos modelos es la siguiente:

$$MBR_MatL$$

dónde:

MBR = muro sobre base rígida

Mat = Material utilizado en el muro (Concreto = C, Mampostería = M)

L = Longitud del Muro en metros

La *tabla 4.2* resume las características principales de los seis modelos de muro sobre base rígida analizados con elementos finitos.

Tabla 4.2 Modelos de muros sobre base rígida estudiados

Modelo	Concreto	Mampostería	Longitud Muro (m)	Figura
MBR_C2.5	X		2.50	5.2.a
MBR_M2.5		X	2.50	5.2.a
MBR_C3	X		3.00	5.2.b
MBR_M3		X	3.00	5.2.b
MBR_C3.75	X		3.75	5.2.c
MBR_M3.75		X	3.75	5.2.c

4.5 PROPIEDADES DE LOS MODELOS REALIZADOS EN ANSYS

En esta sección se indican las propiedades inherentes asignadas a los modelos estudiados en ANSYS, como sus materiales, geometría, características del refuerzo y, también,

particularidades propias del programa, como son los tipos de elementos considerados, cargas aplicadas y criterios de falla de los materiales.

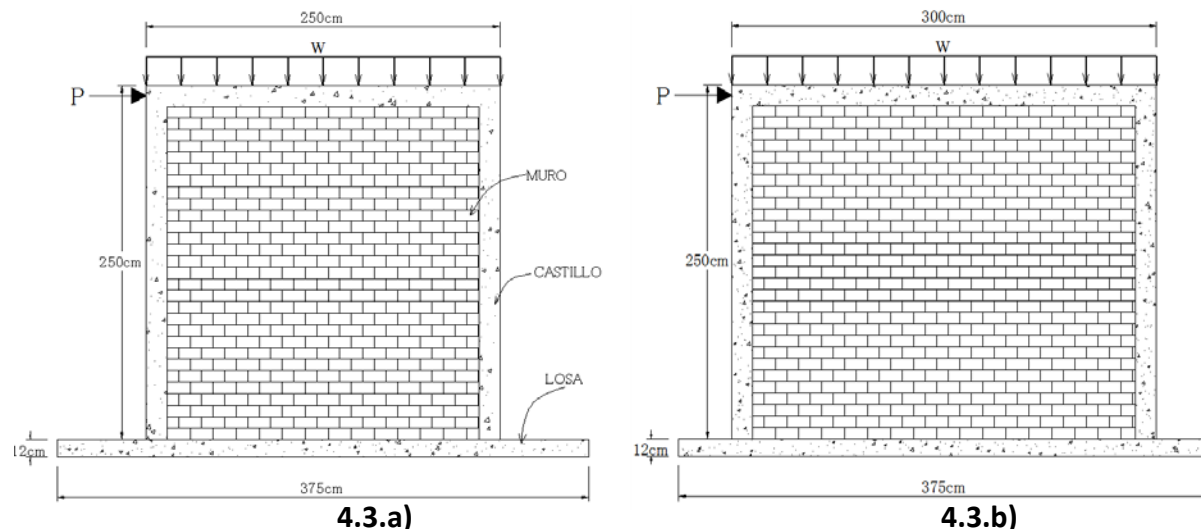
4.5.1 MATERIALES

Básicamente, en los modelos estudiados se asignaron las propiedades de los materiales de la *sección 7.3.1*, referidos al Apéndice A, de acuerdo a las pruebas de laboratorio realizadas; esto con el fin de que los resultados de los modelos sean representativos de los resultados de la prueba de laboratorio. Sin embargo, con respecto al acero el modelo no lineal asignado es un modelo bilineal que se comenta más adelante.

4.5.2 GEOMETRÍA DE LOS MODELOS

Las *figuras 4.3 y 4.4* muestran las dimensiones de los modelos estudiados así como las cargas P y w aplicados. Como ya se indicó, con el fin de ahorrar tiempo computacional y facilitar la convergencia en los modelos, se decidió analizar solamente la mitad del modelo. En la *figura 4.4* se representan la condición de apoyo de la losa que se considera totalmente restringida en todos sus bordes, otras condiciones de apoyo quedan fuera del alcance de este estudio. La *figura 4.3.a* presenta el modelo generado, que tiene las mismas dimensiones que el espécimen de prueba del laboratorio, tanto del espesor de losa y muro como la longitud de este último, asignándole al modelo idénticas propiedades de los materiales.

Cabe hacer notar que de cada uno de los modelos de la *figura 4.3* se hicieron dos versiones una con muro de mampostería confinada y el otro con muro de concreto, con el fin de evaluar si hay diferencias significativas en el comportamiento de uno y otro.



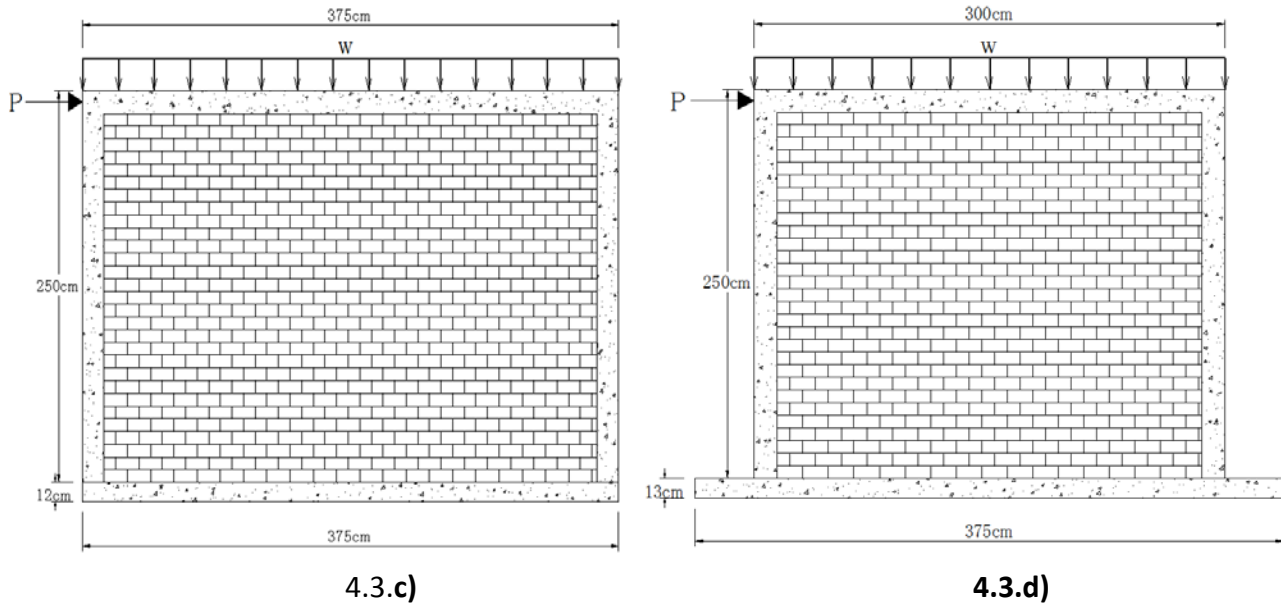


Figura 4.3 Dimensionamiento y condiciones de los modelos estudiados en ANSYS.

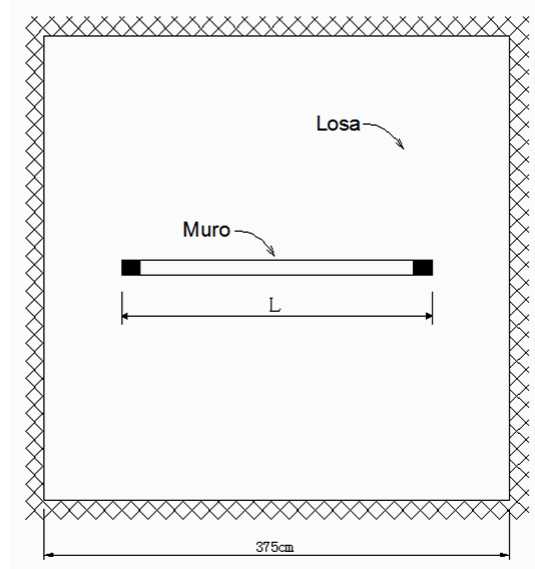


Figura 4.4 Vista en planta de los modelos a realizar variando L y espesor de la losa.

4.5.3 ACERO DE REFUERZO EN LOSA, CASTILLOS Y DALAS

En vista de que uno de los objetivos del estudio es simular lo mejor posible en una computadora lo que podría ocurrir en la realidad, se tomó como base para el armado de refuerzo el modelo *M2_M2.5_12V*, según la *tabla 4.1*, el cual corresponde al espécimen de prueba construido en el laboratorio. Para los demás modelos se hicieron modificaciones al armado para adecuarlos a cada caso, cambiando las dimensiones y el material que compone el muro confinado (concreto y mampostería). Con respecto a los modelos con muros de concreto,

se debe aclarar que estos solo llevan armado en los extremos del mismo, tanto vertical como horizontalmente. Los detalles del armado basados en el modelo mencionado se muestran en las secciones 7.4.1.3 y 7.4.1.4.

4.5.4 MALLADO DE LOS MODELOS

El mallado requiere de bastante cuidado y buen criterio para definir adecuadamente el tamaño de los elementos. La fase de la elaboración del mallado se inicia con definir un modelo en tres dimensiones en *AutoCAD*. Es importante que el dibujo sea realizado con mucha precisión; esto evita en gran medida contratiempos posteriores.

Las figuras 4.5 y 4.6 muestran la forma en que se ensambla el acero de refuerzo de los modelos, y también cómo se acoplan los elementos de concreto simple (losa, castillos y dala), además del muro, que puede ser de mampostería o de concreto. Estos mallados se generan con el programa *GiD* al importar los dibujos de *AutoCAD*. Una vez que son generados los mallados individuales se acoplan los elementos de acero y de concreto o mampostería, para que finalmente se genere un archivo de texto en el cual se describen las coordenadas en tres dimensiones de cada nodo, así como, las conectividades para cada elemento.

El mallado de los modelos realizados quedó regido por la posición y espaciamiento del acero de refuerzo, en base a ello se generó la malla para los elementos sólidos, en vista de que los nodos de los elementos para el acero de refuerzo deben coincidir perfectamente con los nodos de los sólidos para el concreto y la mampostería.

Este fue un punto importante para la elaboración de los mallados; en algunos casos no se cumplió con algunas relaciones de aspecto recomendadas, sin embargo esto no causó problemas o pérdida de precisión en los análisis.

La configuración del acero de refuerzo consiste de barras del número 3 (3/8") a cada 20 cm en el lecho inferior (momento positivo); y bastones a cada 40 cm en el lecho superior, intercalados con "columpios" a la misma distancia de 40 cm (momento negativo). Los castillos y la dala estas reforzados con cuatro barras del número 3 y estribos a cada 20 cm. Más detalles sobre el armado de acero se encuentran en la figura 7.4 del *Capítulo 7*.

4.5.5 GENERACIÓN DE LOS MODELOS EN ANSYS

El enfoque principal de este capítulo no está orientado a explicar cómo funciona teóricamente el análisis con elemento finito; más bien, está dirigida a hacer uso de esta poderosa herramienta para fines prácticos y la obtención de resultados. Sin embargo es menester hacer

referencia, aunque de manera superficial, a los conceptos teóricos básicos utilizados para el modelado y sus propiedades.

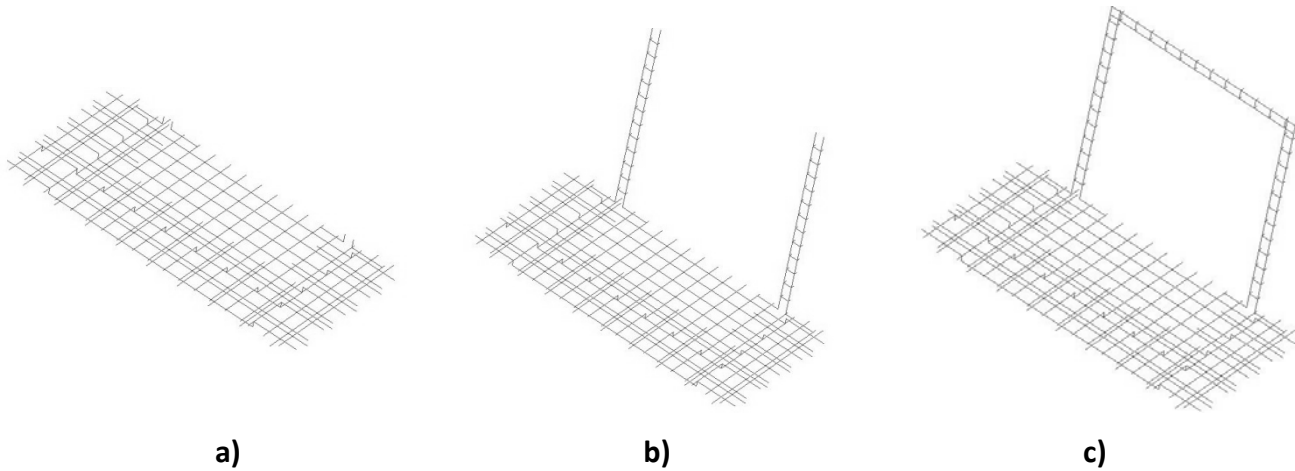


Figura 4.5 Ensamble de mallado para el acero de refuerzo a) Losa, b) Losa-castillo c) Losa – castillos – dala

4.5.5.1 TIPOS DE ELEMENTOS SELECCIONADOS

El programa *ANSYS* posee una gran cantidad de tipos de elementos con propiedades de análisis únicas y específicas para cada problema, algunos muy especializados. Por lo tanto, es necesario saber cuál elemento es el más adecuado para realizar cierto estudio. Para los análisis de esta tesis básicamente se han utilizado dos tipos de elementos predeterminados, el *LINK8* y el *SOLID65*; el primero para modelar el acero de refuerzo y el segundo asignado al concreto y la mampostería.

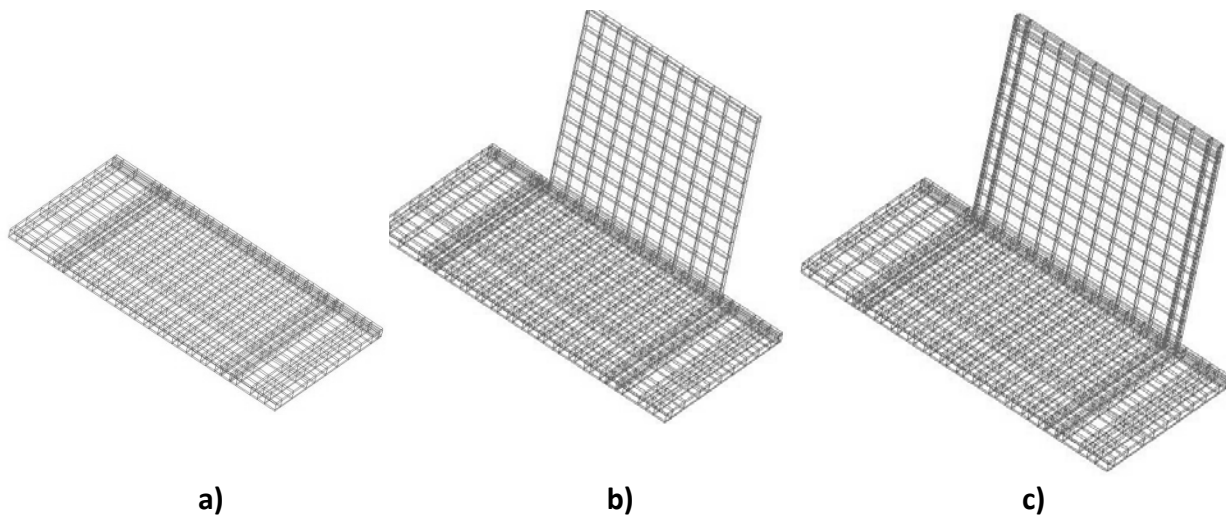


Figura 4.6. Ensamble de mallado de los elementos de concreto a) Losa b) Losa-muro c) Losa-muro-castillos-dala

Se debe señalar que no existe un elemento específico para la mampostería. Aunque teóricamente es posible modelar la mampostería tal cual, resultaría en un modelo bastante refinado, fuera del alcance de esta tesis.

El elemento *SOLID65* es un elemento predeterminado en *ANSYS* para modelar concreto reforzado; sin embargo aquí se ha hecho uso de éste asignándole las propiedades de la mampostería. A continuación se mencionan, a grandes rasgos, algunas características de los elementos utilizados en los análisis sin entrar en detalle en su concepción y estructuración matemática.

4.5.5.1.1 Elemento LINK8

Dentro del programa, el elemento *LINK8* es utilizado en varias aplicaciones ingenieriles. Es un elemento barra compuesto por dos nodos I y J como muestra la *figura 4.7*; posee área transversal, propiedades del material como módulo de elasticidad y relación de Poisson entre otras; además de lo anterior, es posible asignarle propiedades no lineales.

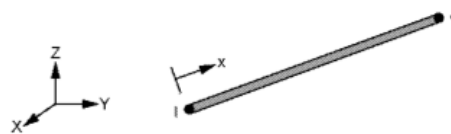


Figura 4.7 Elemento LINK8

El elemento *LINK8* sólo trabaja de manera uniaxial, tanto a compresión como a tensión y la flexión no está considerada en este elemento. Tiene seis grados de libertad, tres en cada uno de sus extremos; estos grados de libertad se refieren a desplazamientos tridimensionales. A continuación se enumeran algunas hipótesis y restricciones que son consideradas por el programa *ANSYS* respecto al modelado del elemento *LINK8*:

- Se considera el elemento como una barra recta, cargada axialmente en sus extremos, posee propiedades uniformes en toda su longitud.
- La longitud del elemento debe ser mayor que cero de tal forma que los nodos extremos no coincidan.
- El área transversal debe ser mayor que cero.
- La temperatura se asume que varía linealmente a lo largo de la longitud de la barra (no considerado en este estudio)
- La función de forma del desplazamiento implica un esfuerzo uniforme en toda la barra.
- La deformación inicial también es usada para calcular la matriz de rigidez; en este caso, para la primera iteración acumulada.

4.5.5.1.2 Elemento SOLID65

Es un elemento sólido para modelar tridimensionalmente concreto simple o reforzado. Este sólido ofrece excelentes resultados, reproduciendo de forma precisa el agrietamiento y el aplastamiento del concreto, en tensión y compresión respectivamente, y modela el comportamiento del acero de refuerzo una vez que el concreto falla.

El elemento *SOLID65* consiste en ocho nodos cada uno de los cuales posee tres grados de libertad traslacionales en los ejes x , y y z , como lo muestra la *figura 4.8*; es capaz de modelar agrietamiento y aplastamiento en las tres direcciones ortogonales mencionadas. Las barras de refuerzo son capaces de modelar tensión, compresión y deformaciones plásticas, pero no esfuerzos cortantes.

Al igual que el elemento *LINK8*, el elemento *SOLID65* también tiene algunas suposiciones y restricciones; entre las más importantes a mencionar son:

- No está permitido tener elementos con volumen cero.
- Todos los elementos deben tener ocho nodos.
- El elemento es no lineal y requiere de una solución iterativa.
- Cuando se considera agrietamiento y aplastamiento, se debe ser cuidadoso en aplicar la carga lentamente; esto para prevenir un aplastamiento ficticio del concreto, antes de la apropiada transferencia de carga pueda ocurrir a través de una grieta cerrada.
- No se recomienda considerar grandes deformaciones o deflexiones, ya que el análisis podría no converger o ser incorrecto, especialmente cuando están involucradas grandes rotaciones.

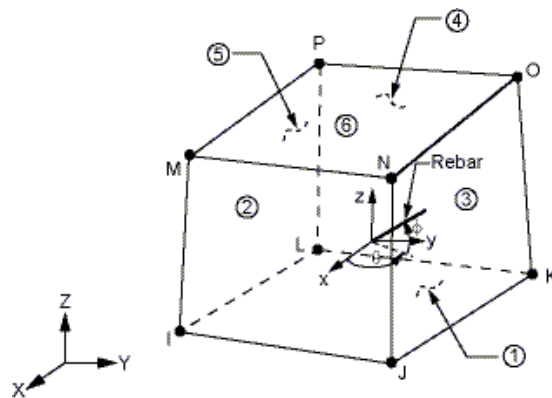


Figura 4.8 Elemento Solido *SOLID65*

4.5.5.2 PROPIEDADES NO LINEALES ASIGNADAS A LOS MODELOS

Una de las grandes ventajas de usar el *ANSYS* es que es posible modelar comportamiento no lineal de estructuras o elementos. Cada elemento puede representar la no linealidad de manera independiente, siendo así diferente el comportamiento no lineal del concreto y del acero.

4.5.5.2.1 Cargas

Las cargas impuestas a los modelos ya sean estas verticales u horizontales son aplicadas gradualmente en forma creciente a través de una gran cantidad de pasos, en cada paso se suma un pequeño incremento de carga hasta llegar a la carga ultima.

4.5.5.2.2 Acero

Para el acero se ha utilizado un modelo bilineal isotrópico, tal como lo muestra la *figura 4.9*, en donde se utiliza el criterio de falla de Von Mises. La regla de endurecimiento describe el cambio progresivo de la superficie de fluencia (*Fig. 4.9.b*). En este caso la superficie de falla se mantiene centrada alrededor del punto inicial o ejes iniciales, expandiéndose en la medida en que las deformaciones plásticas se desarrollan.

5.5.5.2.3 Concreto

Para el caso del concreto, antes que este se agriete se considera que es un material isotrópico lineal. La respuesta no lineal del concreto básicamente está controlada por el agrietamiento progresivo que resulta en una falla localizada. Una vez que ocurre el agrietamiento en el concreto el elemento estructural es debilitado y luego el esfuerzo en el refuerzo y concreto es redistribuido (Zhang 2004).

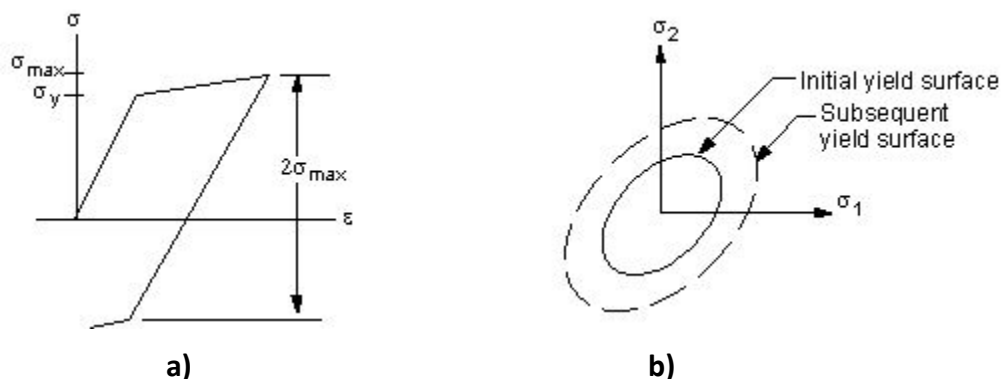


Figura 4.9 a) Modelo Bilineal Isotrópico del Acero b) Criterio de falla

En *ANSYS*, para modelos de concreto, se asignan dos tipos de propiedades al elemento *SOLID65*. Las primeras son las propiedades elásticas, es decir, el módulo de Poisson y el módulo de

elasticidad; para el primero se asignó el valor típico utilizado para el concreto de 0.20. Con respecto al módulo de elasticidad nos basados en los estudios realizados por Tena, Archundia y Gonzales Cuevas (2008) se utilizó $E_c = 150 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$.

Por otra parte también deben ser asignadas las propiedades no lineales del material. Esencialmente se introducen cinco características de comportamiento no lineal:

- Esfuerzo de aplastamiento uniaxial (f'_c)
- Esfuerzo de agrietamiento uniaxial (f_r)
- Coeficiente de transferencia de cortante en grieta abierta (β_t)
- Coeficiente de transferencia de cortante en grieta cerrada (β_c)
- Factor de agrietamiento a tensión (T_c)

Al esfuerzo máximo de compresión, f'_c , se le asignó un valor de 250 kg/cm², a partir del cual se supone un esfuerzo máximo de ruptura (f_r) de 25 kg/cm², que corresponde al 10% del esfuerzo máximo a compresión.

Los coeficientes β_t y β_c representan las condiciones de la cara de la grieta. Es común usar valores para β_c entre 0.9 y 1.0 (Zhang 2004). En los análisis se utilizó la unidad como valor de éste parámetro. En cuanto a β_t los valores varían entre 0 y 1.0, siendo 0 una grieta “lisa” en donde ocurre una pérdida total en la transferencia del cortante, y 1.0 una grieta rugosa en donde no existe pérdida en la transferencia de cortante (Dahmani, Khennane, Khaci 2010).

El factor de agrietamiento por tensión T_c , el cual es un multiplicador de la cantidad de relajación del esfuerzo de tensión, la *figura 4.10.a* muestra claramente su interpretación.

El programa considera que el concreto puede fallar uniaxial, biaxial o triaxialmente. En la *figura 4.10.b* se aprecian las condiciones de falla las cuales dependen de la superficie de falla de determinado elemento. Como es de esperarse para el concreto el área de falla a tensión es mucho más pequeña que la de compresión.

4.5.5.3 CARGAS Y RESTRICCIONES DE APOYO DE LOS MODELOS

El comportamiento de una estructura no depende exclusivamente de sus propiedades físicas y mecánicas; la configuración de las cargas que se le aplican determinan en gran medida su reacción y respuesta. Cuando se trata de estructuras estáticas son importantes las condiciones de apoyo, pues estas juegan un papel relevante en el comportamiento estructural.

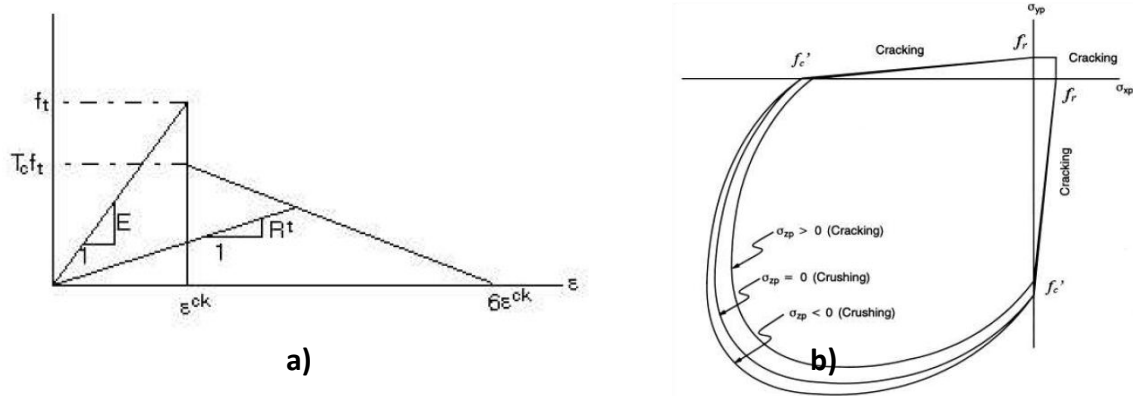


Figura 4.10. a) Esfuerzo en condición agrietada b) Esquema Superficie de falla en el espacio del esfuerzo principal (Willan and Warnke, 1975)

La *figura 4.4* muestra en planta la losa analizada, se restringieron sus bordes en todos sus grados de libertad, tanto en giro como desplazamiento. Para los propósitos de esta tesis se ha considerado la aplicación de dos tipos de cargas, como de muestran en la *figura 4.3*, una carga vertical w distribuida como presión a lo largo de la parte superior del muro, y una carga lateral P en la parte superior del muro para simular los efectos sísmicos.

Se tomaron en cuenta dos combinaciones de carga; en la primera se aplicó la carga vertical w última en forma incremental (*Capítulo 5*), y en la segunda se aplicó una carga de servicio vertical w más una carga lateral P en forma incremental (*Capítulo 6*). Cabe recalcar que para este estudio todos los modelos realizados en ANSYS son no lineales.

Para el caso de los modelos sometidos únicamente a carga vertical, se restringió el movimiento lateral del muro para evitar distorsiones que provoquen excentricidades de carga y que pudiesen resultar en resultados erróneos.

Respecto a los modelos con carga vertical de servicio más carga lateral, éstos son geoméricamente diferentes. Sobre el muro se ha agregado una losa de concreto muy rígida como se aprecia en la *figura 4.11*, simulando la losa colocada en la parte superior del muro, la cual se considera como un diafragma rígido. La carga lateral incremental es aplicada a dicha losa superior y no directamente al muro; de esta forma se asegura que no hay giros significativos en la zona superior del muro. En los modelos con carga combinada, la carga vertical P se aplicó también en forma de presión en la parte superior del muro.

Es importante mencionar que en los modelos sometidos a carga combinada, la carga vertical se aplicó primero en forma incremental con lo que se pudo determinar el comportamiento del sistema bajo carga de servicio. Después se reiniciaban los modelos aplicándoles la carga lateral incremental en un solo sentido, partiendo del estado de esfuerzos y deformaciones dejados por la aplicación de la carga vertical.

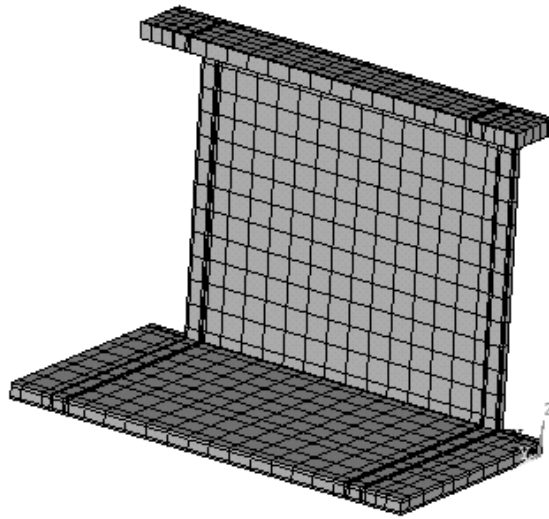


Figura 4.11 Modelo con losa superior utilizado para el análisis ante carga lateral

4.6 DISCUSIÓN

Es fundamental, cuando se realiza un análisis con el método de elementos finitos a través de un paquete computacional especializado; en primer lugar, se deben tener claras las limitaciones y capacidades del programa de tal forma que se pueda obtener de este, el mayor provecho; así como tener conocimiento mínimo de cómo funciona internamente el mismo. En segundo lugar, se debe tener un buen criterio en la elaboración del modelo; por ejemplo, determinar el mallado adecuado, asignar los elementos idóneos de la librería del programa, aplicar las cargas en forma acertada y finalmente interpretar correctamente los resultados.

CAPITULO 5

Análisis no lineal con elementos finitos de modelos losa-muro ante carga vertical

5.1 INTRODUCCIÓN

En el *Capítulo 2* se describió un estudio realizado en algunos edificios reales construidos recientemente en la Ciudad de México estructurados con losas de transferencia. Además, en el *Capítulo 3* se realizó un estudio paramétrico sobre el comportamiento de edificios estructurados con losas de transferencia y el efecto que dichas losas generan en el comportamiento global del edificio.

Ahora bien, en el presente capítulo se estudia en forma más detallada la interacción losa – muro de los modelos descritos en el *Capítulo 4*, específicamente los modelos se someten a una carga vertical w aplicada directamente sobre el muro y se realiza su análisis con el método de los elementos finitos.

El análisis se enfoca en el comportamiento no lineal, no sólo de la losa, sino también de los muros. Uno de los principales objetivos es obtener curvas de capacidad de los sistemas losa-muro. Además de ello se proponen nuevos patrones de agrietamiento de las losas estudiadas sometidas directamente a carga vertical a través del muro.

Se debe hacer notar que, para los modelos analizados, se ha considerado que la losa se encuentra en sus bordes sobre apoyos infinitamente rígidos, restringiendo todos sus grados de libertad en dichos bordes. La suposición anterior no está lejos de la realidad, ya que se ha verificado en los modelos de los edificios reales construidos recientemente con este tipo de estructuración, donde las vigas de apoyo son muy peraltadas, lo cual proporciona a las losas una gran rigidez y poca deformabilidad.

5.2 PUNTOS DE MONITOREO DE DESPLAZAMIENTOS VERTICALES

Uno de los parámetros que describen de manera directa el comportamiento de cualquier estructura son sus desplazamientos; al conocer estos y las propiedades de los materiales, se puede inferir acerca del estado de deformación resistencia y rigidez de dicha estructura durante todo el proceso de aplicación de determinada solicitación. Es por tal motivo que para los modelos estudiados ha sido de suma importancia el monitoreo de determinados puntos

clave, de los cuales interesa conocer su historial de desplazamientos a lo largo de la aplicación de determinada carga.

Se definieron seis nodos específicos del mallado para registrar y representar su comportamiento. La *figura 5.1* muestra los seis puntos de control seleccionados. Así el punto 1-A se localiza al pie del castillo en la parte superior de la losa, el punto 1-B se localiza justamente debajo del punto 1-A, con la diferencia que este se encuentra en la parte inferior de la losa. Siguiendo con la misma idea los puntos 2-A y 2-B se ubican justamente al centro del claro, el primero en la parte superior de la losa y el segundo en el fondo de la misma.

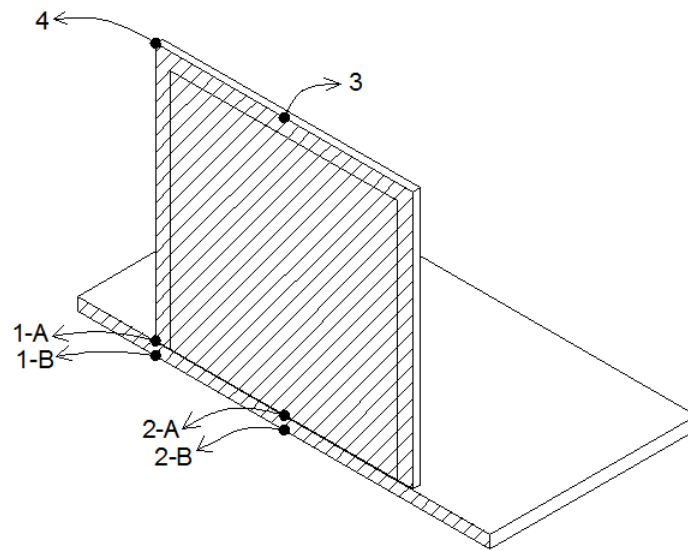


Figura 5.1 Localización de los puntos de monitoreo de desplazamientos verticales

Los puntos de monitoreo 3 y 4 se encuentran ubicados en el muro, el primero al centro de la longitud del mismo, y el segundo en una esquina. Una de las principales razones de la ubicación de los puntos de control es investigar qué tanto se flexionan la losa y el muro en su zona inferior, y así conocer las diferencias de desplazamientos entre los puntos 1 y 2, dada la carga del muro. La misma idea se aplica a los puntos 3 y 4.

Por otra parte, siendo este uno de los objetivos principales de este capítulo, se obtienen las curvas de capacidad de la losa, relacionando la carga aplicada con los desplazamientos en los diferentes puntos de monitoreo. Por lo tanto, se obtendrán seis diferentes curvas de cada modelo.

5.3 LOSA CUADRADA CON CARGA UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDA

Aunque el estudio de losas uniformemente cargadas en toda su área no forma parte de los objetivos de esta tesis, se consideró necesario y pertinente estudiar un modelo de elementos finitos de una losa cargada uniformemente con las mismas características que las losas utilizadas en los modelos de losas de transferencia, es decir, con un espesor de 12 centímetros. Lo anterior con el propósito principal de comparar dicho modelo con los de losa de transferencia.

Al igual que los modelos de losa de transferencia, las dimensiones entre ejes de la losa cuadrada son de 4 metros, con un claro libre de losa de 3.75 metros, con una cuantía y armado de acero de refuerzo idénticos y un espesor de losa de 12 cm.

Se impuso a la losa una carga última por unidad de área de 4 ton/m^2 , que es bastante mayor a las utilizadas en el diseño de edificios. También es importante mencionar que la losa es aislada restringida en sus bordes en todos sus grados de libertad y que al igual que los modelos de losa de transferencia sólo se ha modelado la mitad de la misma. De ahora en adelante se le conocerá a este modelo con la nomenclatura LCU_12 (losa cargada uniformemente de 12 cm de espesor).

5.3.1 CURVA DE CAPACIDAD DE LOSA CARGADA UNIFORMEMENTE

Para determinar la curva de capacidad de este modelo se tomó como referencia de monitoreo el punto 2-B de la *figura 5.1*, en vista de que bajo el estado de carga analizada este punto presenta las mayores deformaciones verticales en la losa (en este caso se modeló la losa sin muro).

La *figura 5.2* muestra la curva de capacidad de la losa en términos del desplazamiento vertical del punto 2-B y de la carga uniforme aplicada de manera incremental; se puede apreciar que aproximadamente hasta una carga de 0.80 ton/m^2 la curva es recta, por lo que se supone que la losa se mantiene sin agrietamiento o daño alguno. Después de este punto, aparece la primera pérdida de rigidez caracterizada a través del agrietamiento que la losa sufre. La carga de 0.80 ton/m^2 es una carga de diseño promedio común para este tipo de losas, tomado en cuenta que dicha carga incluiría todas las cargas vivas y muertas actuando de forma simultánea.

De manera gradual la losa pierde rigidez a medida que la carga aplicada aumenta, esta situación se observa hasta que se alcanza una carga de 5.6 ton/m^2 (equivalente a 78 ton), según lo muestran las *figuras 5.2 y 5.3*. Aquí se presenta una meseta considerable llegando hasta una deformación de 20 mm; en este punto la losa se encuentra bastante agrietada.

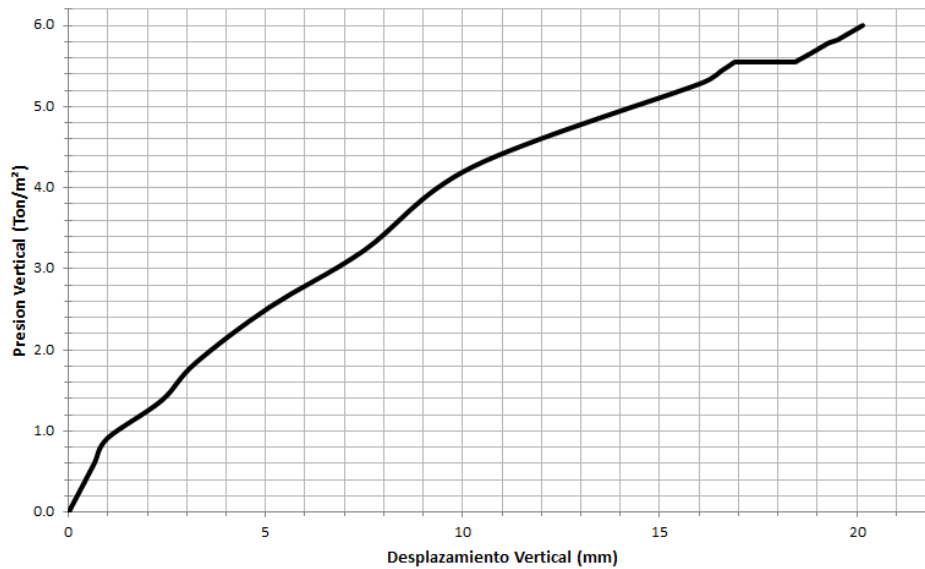


Figura 5.2 Curva de capacidad, presión vs. desplazamiento vertical al centro del claro modelo LCU_12

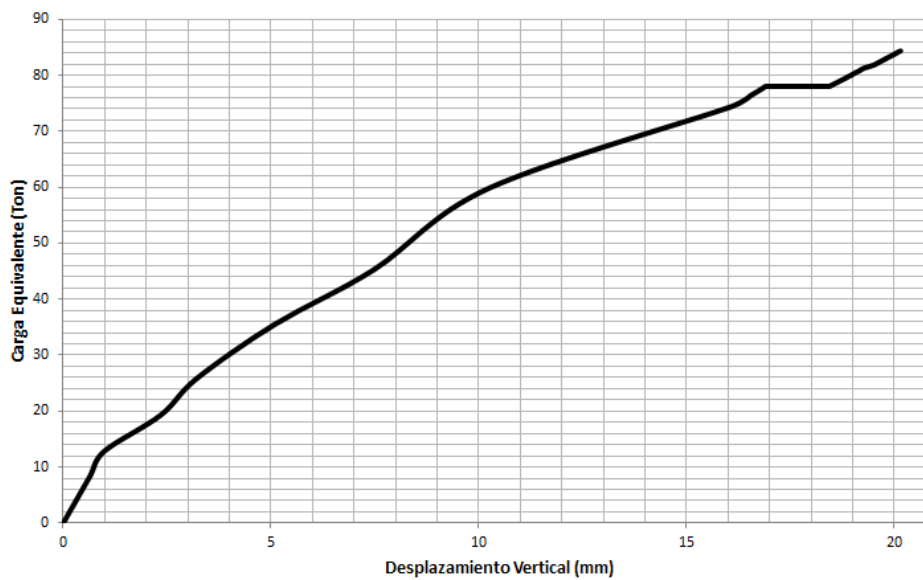


Figura 5.3 Curva de capacidad: carga equivalente vs. desplazamiento vertical al centro del claro de la losa, modelo LCU_12

Debe notarse la gran sobrerresistencia de este tipo de estructuras, las cuales soportan una carga mucho más allá de su carga de diseño, sin embargo, aunque esto pase se deben verificar que las condiciones de servicio sean satisfechas.

Otra forma de representar la curva de capacidad, aunque esta conserva su forma, es a través de una carga equivalente total ejercida sobre la losa la cual se obtiene por la simple multiplicación

de la presión ejercida en cada paso de carga por el área total de la losa, como se muestra en la ecuación 5.1. Esta carga sería meramente simbólica, en vista de que no tiene un punto de aplicación definido. La gráfica de dicha curva está representada en la *figura 5.3*, alcanzando una carga máxima de aproximadamente 55 toneladas.

$$P_{eq} = A_t p_i \quad (5.1)$$

Dónde:

P_{eq} = carga equivalente, en tonelada

A_t = area total del panel de losa

p_i = presión aplicada a la losa en el i – esimo paso de carga

5.4 MODELOS DE LOSA CON MURO CARGADOS VERTICALMENTE (ANÁLISIS POR DESPLAZAMIENTOS)

En esta sección se presentan los resultados de los análisis de los modelos de losa de transferencia realizados con elementos finitos. A través de curvas carga contra desplazamiento en los puntos de monitoreo antes mencionados, se midió la capacidad última de cada losa analizada. Además, se establecen los patrones de agrietamiento observados en la losa y se comenta sobre el comportamiento del muro de carga y su interacción con la losa ante la carga vertical aplicada.

Con respecto a la carga vertical aplicada, como se observa en la *figura 5.3*, los modelos fueron cargados sólo en la parte superior del muro (no existe ninguna otra carga directa sobre la losa), puesto que interesa evaluar el impacto de la carga transmitida del muro a la losa.

En la mayor parte de los casos se ha encontrado que la carga equivalente de servicio que el muro acarrea producto de los pisos superiores y que transmite a la losa, es varias veces mayor que la carga de servicio actuante en la propia losa. Es por eso que no es posible aplicar el método de diseño por coeficientes propuesto en la NTC para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto del Distrito Federal, en vista de que la carga ejercida por el muro generalmente rebasa el 50% de la carga total sobre la losa, como lo limita dicha normativa.

Como carga equivalente del muro se entiende aquella que se transmite a través del muro que descarga en un panel del piso de transferencia la cual es dividida por el área total de dicho panel, resultando una carga por unidad de área.

5.4.1 MODELOS M1_C2.5_12V Y M2_M2.5_12V

Las características físicas y geométricas de los modelos estudiados han sido descritas en el *Capítulo 4*; geométricamente son idénticos, la diferencia principal radica en el material utilizado en el muro confinado. El primer modelo es de concreto reforzado, mientras que el segundo es de mampostería confinada.

Se pueden hacer algunas observaciones acerca del comportamiento de uno y otro modelo. En primer lugar, se observa que los desplazamientos de los nodos del modelo M1.C2.5_12V (*figura 5.4*) resultan ser mucho más homogéneos que en el caso de su similar de mampostería (*figura 5.5*), como se verá más adelante. Esto se debe a la diferencia de rigidez de ambos muros, en donde el muro de concreto se mueve como un conjunto con la losa. En cambio el muro de mampostería tiende a flexionarse más permitiendo de esta forma mayores deformaciones diferenciales en toda su longitud. Otro punto a destacar en este caso, es que se entiende como la curva de capacidad de la losa, aquella curva en la cual se genera la primera fluencia importante del sistema.

Al respecto, se entiende como fluencia en el sistema, el aumento considerable de deformación ante una pequeña o nula aplicación de carga, tal como se aprecia en las curvas de capacidad.

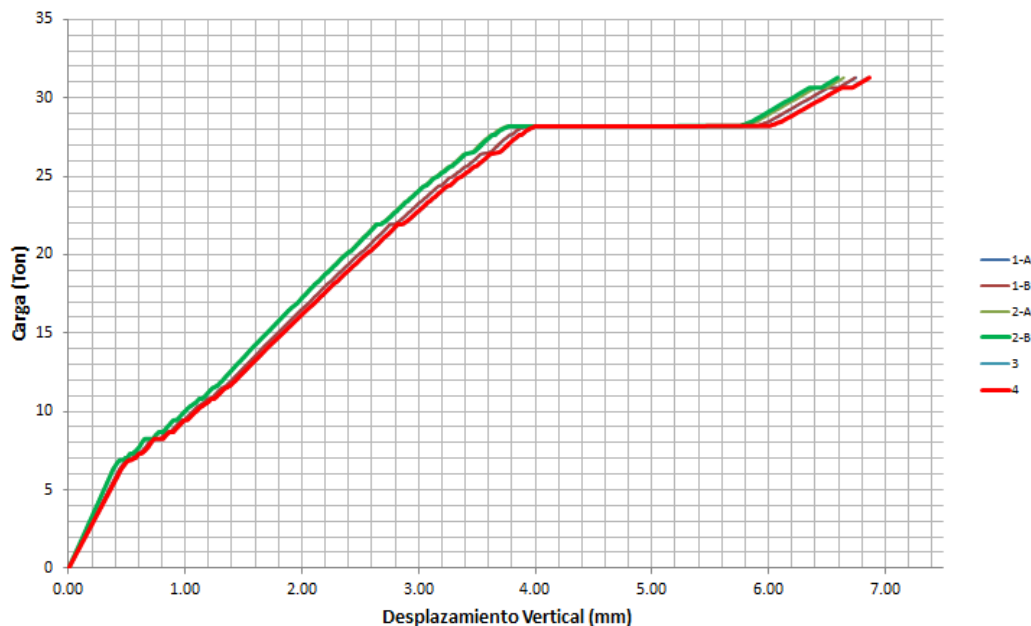


Figura 5.4 Carga Vs. Desplazamiento modelo M1_C2.5_12V

De acuerdo a las *figuras 5.4 y 5.5* se puede considerar que la curva de capacidad de cada modelo es independiente de cualquiera de los cinco puntos de monitoreo, sobre todo en el caso de muro de concreto. Es decir para el modelo M1_C2.5_12V se está considerando como

punto crítico el punto 2-B en cambio en el modelo M2_M2.5_12V se ha considerado el punto de monitoreo 1-A, ya que en ambos puntos se genera la primera fluencia significativa del sistema.

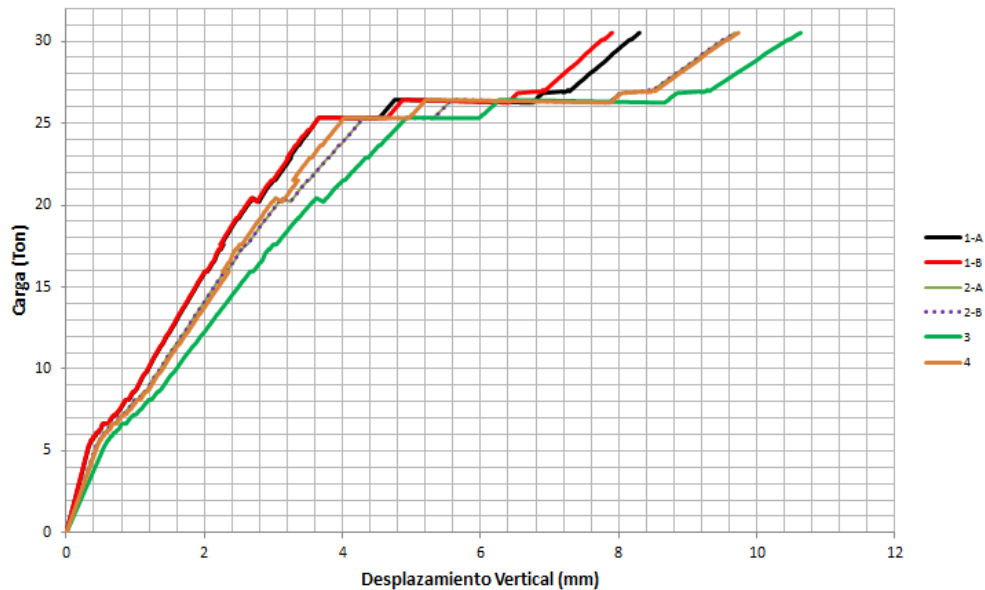


Figura 5.5 Carga Vs. Desplazamiento modelo M2_M2.5_12V

La *figura 5.6* muestra el contorno de deformaciones, donde se puede observar el efecto de la rigidez del muro sobre su deformación, lo que al mismo tiempo influye en la capacidad de la losa, como se aclarará más adelante.

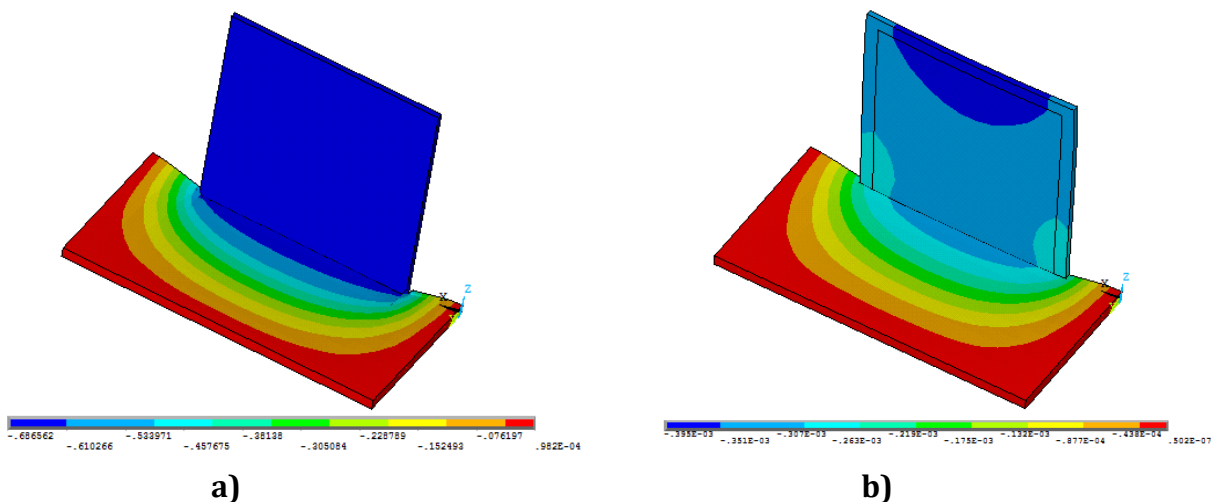


Figura 5.6 Contorno de deformaciones verticales: a) M1_C2.5_12V b) M2_M2.5_12V

Como se mencionó anteriormente, en el modelo con muro de concreto (*figura 5.6.a*) el muro se desplaza como un todo, tendiendo a punzonar la losa. En ese caso toda la energía de

deformación es absorbida por la losa. En cambio, cuando el muro es menos rígido, como es el caso del modelo M2_M2.5_12V, con muro de mampostería, éste absorbe parte de las deformaciones, ocasionando que la losa llegue a deformarse verticalmente en un porcentaje mayor, tal como se observa en la gráfica de la *figura 5.7*.

Se pueden resaltar varios aspectos claramente a partir de la gráfica de la *figura 5.7*. Por una parte, el modelo con muro de concreto tiende a seguir un comportamiento más estable, mostrando tres líneas de tendencia principales; la primera, una fase elástica perfecta; la segunda, una vez que sufre el primer agrietamiento pierde rigidez aunque es una tendencia muy estable; la tercera etapa, una línea horizontal muy bien definida, que representa la fluencia del sistema. Además se puede identificar una cuarta etapa caracterizada por una pequeña recuperación.

En el caso del modelo con muro de mampostería, cuya curva de capacidad es un poco irregular, se observa una tendencia muy parecida a la curva del modelo con muro de concreto. De ambas curvas de la *figura 5.7* se puede concluir que aunque la losa del modelo M1_C2.5_12V resiste poco más de carga que la del modelo M2_M2.5_12V, se deforma menos y su falla sería más súbita, mientras que en el modelo con muro de mampostería la losa resiste poco menos pero puede deformarse más. Además de ello, su falla sería más gradual. De la misma forma se puede apreciar que en ambos modelos el comportamiento es prácticamente idéntico dentro del rango lineal.

Cabe aclarar que aquí se considera como la resistencia última de un modelo la carga donde se tienen excesivos elementos aplastados, o bien, cuando hay elementos muy agrietados que son incapaces de transmitir rigidez alguna a sus elementos adyacentes.

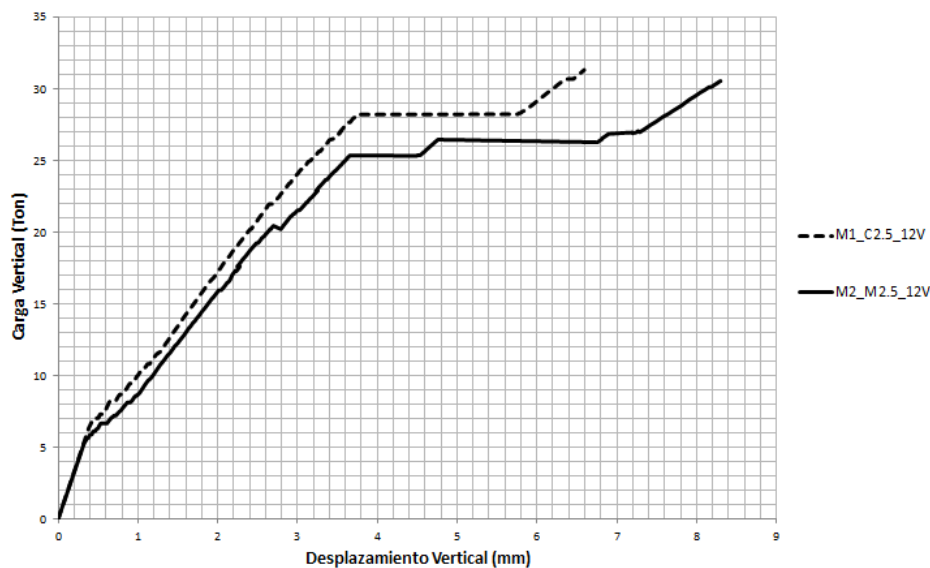


Figura 5.7 Comparación curvas de capacidad modelos M1_C2.5_12V y M2_M2.5_12V

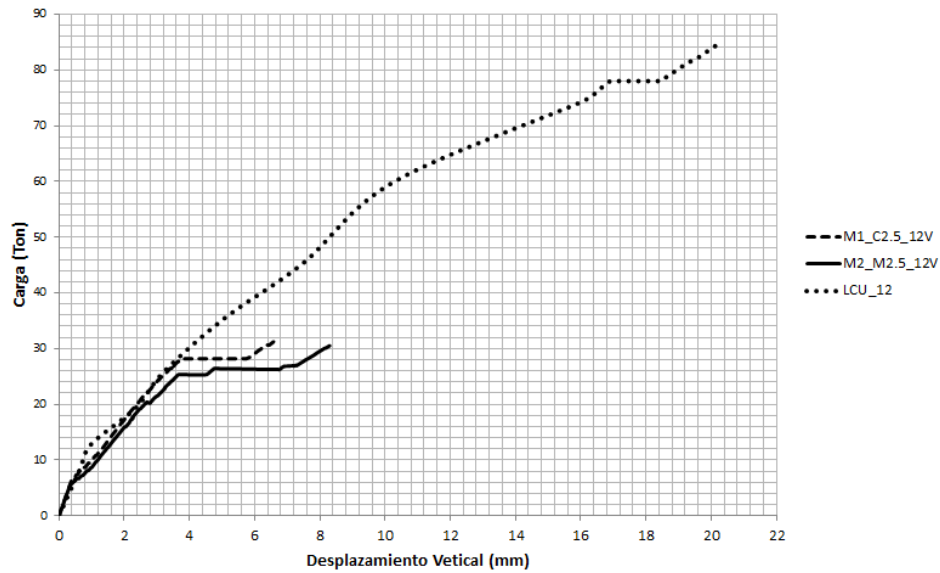


Figura 5.8 Comparación curvas de capacidad modelos M1_C2.5_12V, M2_M2.5_12V y LCU_12

Es interesante observar de la *figura 5.8*, la gran diferencia entre la capacidad del modelo LCU_12 (losa con carga uniformemente distribuida) y la de los modelos con losa de transferencia. La capacidad del primero supera en más de 150% la capacidad de los modelos con losas de transferencia, si se consideran las deformaciones verticales al centro del claro.

5.4.2 MODELOS M3_C3_12V Y M4_M3_12V

En esta sección se presentan las curvas de capacidad de los modelos con muros de concreto y mampostería cuya longitud es de tres metros a lo largo del eje central de la losa de concreto de 12 centímetros de espesor.

En la *figura 5.9* se observan las curvas de capacidad en diferentes puntos del modelo señalado. Al igual que en la sección anterior para muros de concreto se aprecia una marcada homogeneidad en los desplazamientos verticales del muro y de los puntos de la losa justamente debajo de ellos. La primera fluencia importante del sistema sucede a las 30 toneladas de carga vertical, seguidamente se observa una recuperación hasta llegar finalmente a las 34 toneladas.

El modelo con muro de mampostería tiende a comportarse de manera diferente, siendo el punto más crítico el punto 1-A, justamente al pie del castillo. En los modelos estudiados se ha observado que este punto y su zona circundante son bastante susceptibles a sufrir aplastamiento del concreto, tanto del castillo de confinamiento como del concreto de la losa.

La *figura 5.10* ilustra el comportamiento de los puntos de monitoreo del modelo M4_M3_12V. Se determinó que para este modelo la curva de capacidad está representada por el punto de control 1-A, en vista de que dicho punto es el primero que presenta una fluencia significativa.

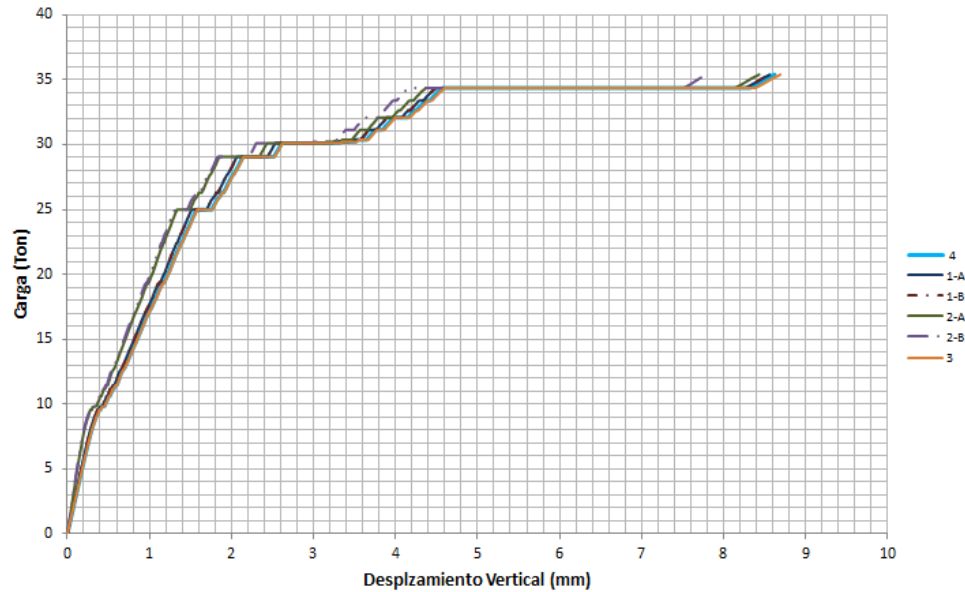


Figura. 5.9 Carga Vs. Desplazamiento modelo M3_C3_12V

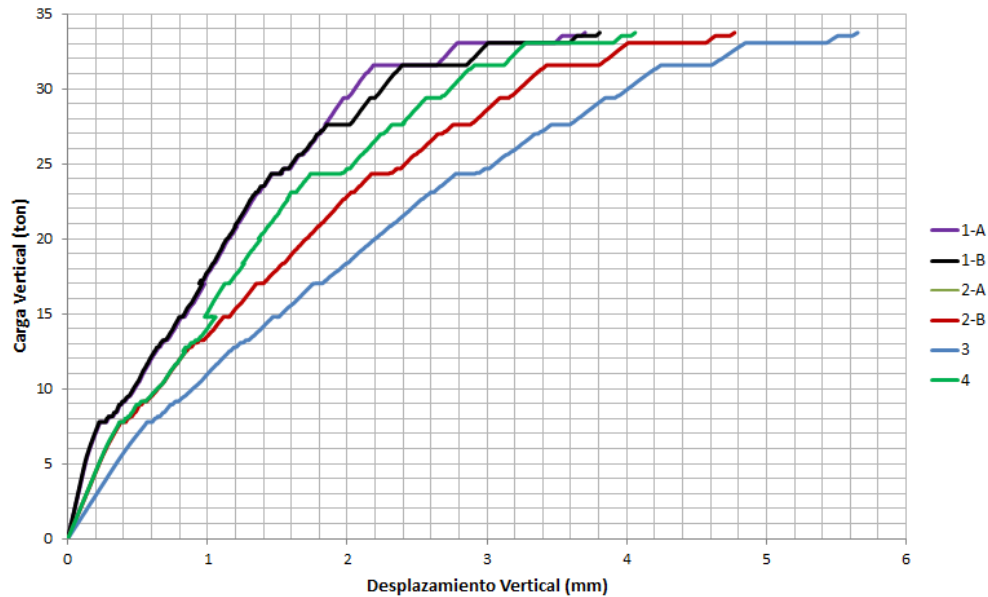


Figura. 5.10 Carga Vs. Desplazamiento modelo M4_M3_12V

En la *figura 5.10* se destacan las diferencias de desplazamientos entre los puntos 3 y 4, los que se encuentran a una misma altura inicial. En el primero se tiene una curva bastante regular llegando a obtener el desplazamiento máximo del sistema, el cual es cerca de 5.5 milímetros, en cambio el punto 3 tiene un desplazamiento final menor.

Esto se debe a que en el punto de medición 4 se suman dos deformaciones, la de la losa y la del muro de mampostería debido a la carga vertical; en cambio en el punto 3 el cual se encuentra directamente sobre el castillo de concreto, se deforma menos debido a que la rigidez del material es mayor en el concreto que en la mampostería.

A continuación se hace la comparación entre ambos modelos, con el fin de verificar si hay alguna diferencia significativa. De acuerdo a la *figura 5.11* hasta una carga aproximada de 29 Ton ambos sistemas se comportan de forma muy parecida. A partir de esa carga se observa la primera meseta de fluencia en el modelo de M3_C3_12V; lo mismo sucede al modelo M4_M3_12V con unas toneladas más de carga.

Contrario a lo que se observó en la comparación de la *figura 5.7*, donde el modelo con muro de mampostería se puede desplazar verticalmente más, aunque soporta menos carga, en la comparación de la *figura 5.11* el modelo de mampostería soporta más carga pero se desplaza verticalmente mucho menos que su similar de concreto.

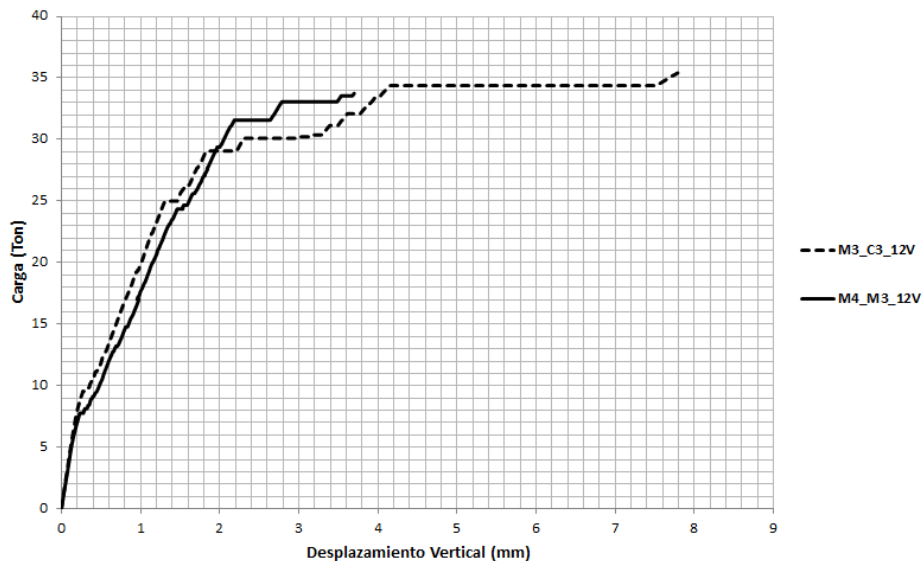


Figura 5.11 Comparación curvas de capacidad modelos M3_C3_12V y M4_M3_12V

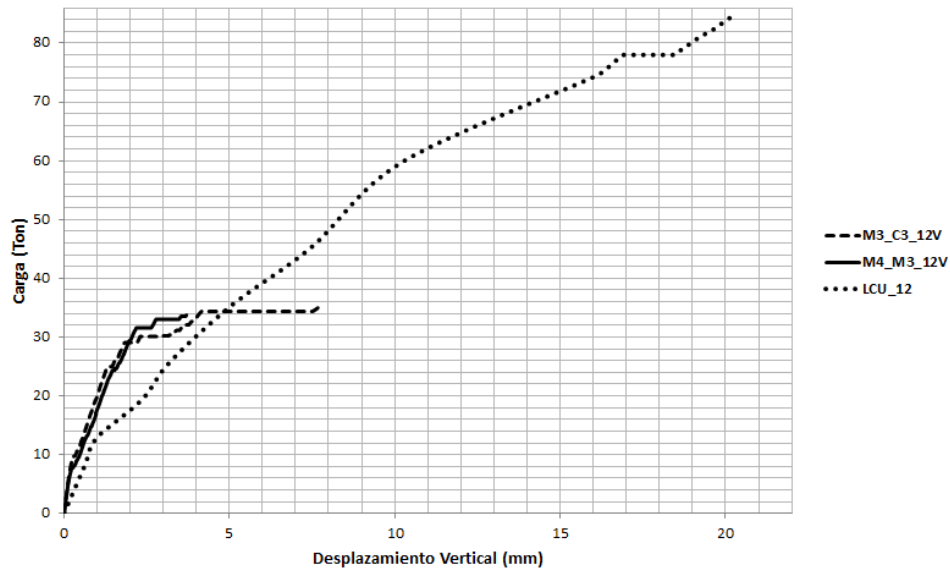


Figura 5.12 Comparación curvas de capacidad modelos M3_C3_12V, M4_M3_12V y LCU_12

También se comparan las curvas de capacidad de los modelos de losa de transferencia y la losa con carga uniformemente distribuida por unidad de área, en donde se detectan marcadas diferencias, tanto en capacidad de carga total como en comportamiento durante el proceso de carga como lo exhibe la *figura 5.12*.

5.4.3 MODELOS M5_C3.75_12V Y M6_M3.75_12V

La particularidad de estos modelos es que cruzan el claro de la losa de lado a lado. A pesar de que al modelo con muro de concreto (M5_C3.75_12V) se le impuso una carga vertical un 25% mayor que a los modelos analizados anteriormente, éste en ningún punto dejó de comportarse linealmente, como se observa en la *figura 5.13*. Sin embargo, eso no significa que la estructura no se haya agrietado, como se verá en la *Sección 5.6*, aunque dicho agrietamiento fue muy bajo comparado con el que sufren los modelos hasta aquí estudiados bajo carga vertical.

En gran parte esto se debe a que el muro se puede considerar como una viga esbelta de gran peralte apoyada en los extremos de la losa, los cuales se han modelado como infinitamente rígidos, a diferencia de los modelos anteriores, en donde la totalidad del muro se apoyaba en la losa. De acuerdo a lo anterior, a pesar de la gran carga que se le impone al muro resulta bastante difícil hacer que éste se flexione y que transmita dicha deformación a la losa o viceversa, especialmente cuando el muro es de concreto, el cual es más rígido que el de mampostería.

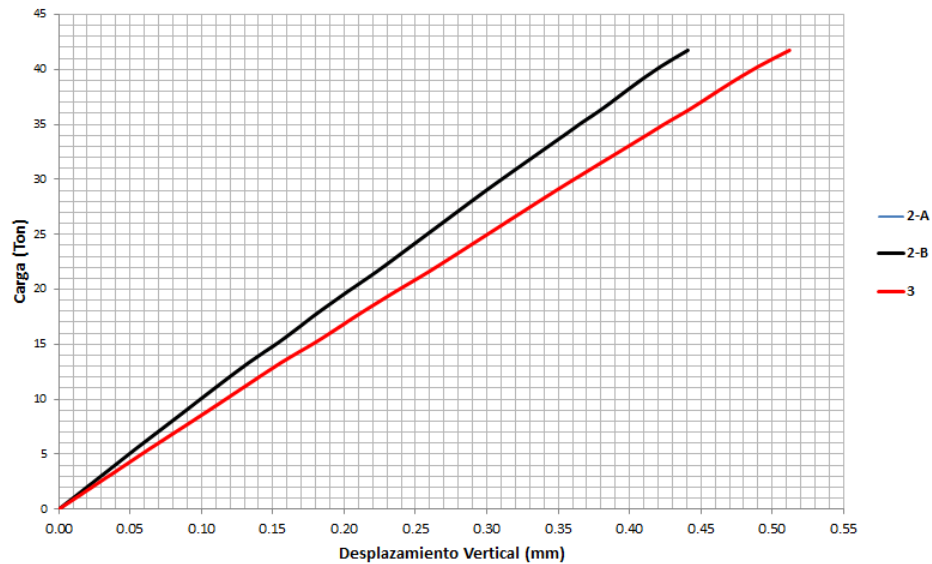


Figura 5.13 Carga Vs. Desplazamiento modelo M5_C3.75_12V

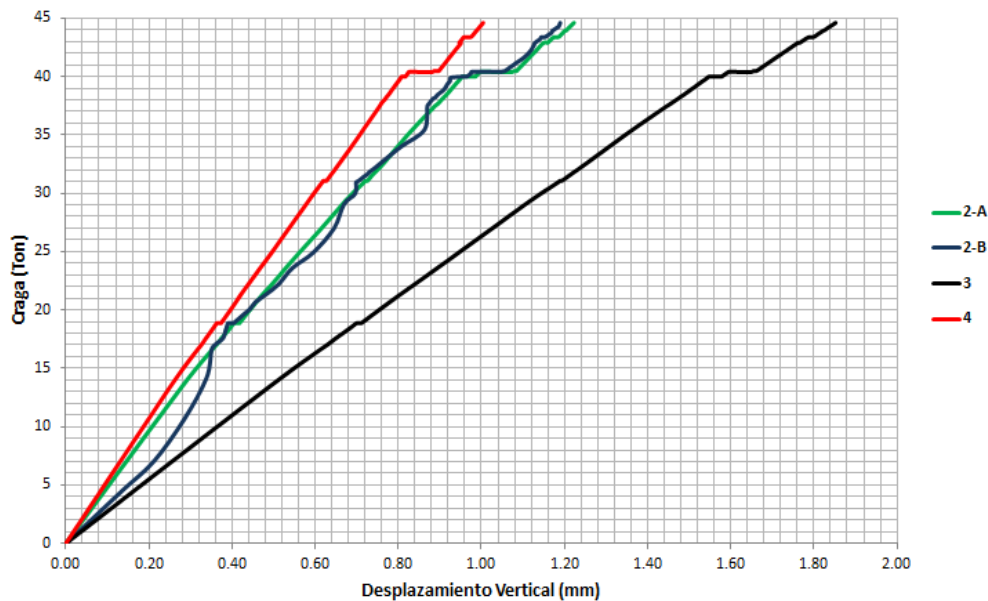


Figura 5.14 Carga Vs. Desplazamiento modelo M6_M3.75_12V

Al igual que en los anteriores modelos con muros de concreto, se puede observar una gran uniformidad en los desplazamientos, de acuerdo a la *figura 5.13*, donde la gráfica del punto 2-A es exactamente la misma que la del punto 2-B.

Por otra parte, en la *figura 5.14* se muestran las curvas de capacidad del modelo con muro de mampostería confinada (M6_M3.75_12V), donde en gran parte de la historia de carga rige un comportamiento elástico, a excepción del punto 2-B. Se puede apreciar que estos dos modelos

comparados con los anteriores se deforman verticalmente mucho menos, llegando el modelo con muro de mampostería a un desplazamiento máximo de 1.80 mm, el cual resulta ser bastante pequeño.

En situaciones donde el muro cruza la totalidad del claro pueden mencionarse varios puntos importantes. En primer lugar la del muro determina la cantidad de carga que el muro transfiere a la losa.

Entre mayor sea su rigidez la carga se conducirá hacia los extremos del muro es decir hacia los apoyos del mismo, actuando como una viga muy peraltada apoyada en sus extremos. Por otra parte, a medida que el muro sea menos rígido éste se flexionara más en su plano, permitiendo así transmitir de forma más uniforme la carga a la losa.

En la *figura 5.15* se *nota* claramente la diferencia de rigideces iniciales de ambos modelos, teniendo el modelo con muro de concreto mucha mayor rigidez que su similar de mampostería. En cuanto a capacidad de carga, es bastante probable que el modelo (M5_C3.75_12V) aún pueda soportar más carga vertical; sin embargo, el programa de elementos finitos utilizado para la construcción de las curvas de capacidad deja de converger a muy pocos pasos de carga cuando se le aplican cargas mayores que la mostrada en la *figura 5.15*.

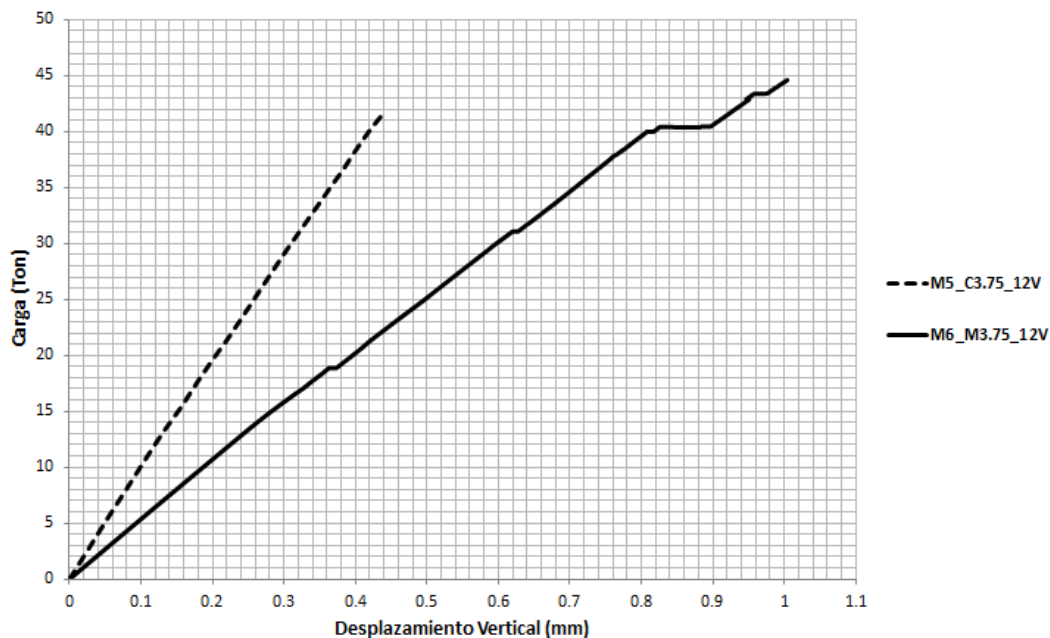


Figura 5.15 Comparación de Curvas de capacidad Modelos M5_C3.75_12V y M6_M3.75_12V

5.4.4 MODELOS M7_C3_13V Y M8_M3_13V

De manera adicional, se estudiaron dos modelos con un espesor de losa de 13 centímetros, en un muro de concreto y el otro de mampostería. El objetivo fue estudiar el cambio en la respuesta del sistema con respecto a los modelos de 12 cm.

La *figura 5.16* muestra las curvas de capacidad del modelo (M7_C3_13V) en diferentes puntos de la estructura siendo el punto 1-A, colocado al pie del castillo en la superficie superior de la losa el que determina la curva de capacidad del sistema, dado que aquí se presenta la primera fluencia de consideración en el sistema. De acuerdo a las curvas de capacidad se puede notar un aumento en la resistencia del sistema respecto al modelo M3_C3_12V (con un espesor de losa de 12 cm).

El modelo M8_M3_13V muestra una mayor capacidad que M4_M3_12V, llegando el primero a una carga máxima de 38 Ton y el segundo a un valor máximo de 33 Ton (*figura 5.17*). Es importante mencionar la capacidad que tienen los modelos con muros de mampostería de poder sufrir mayores deformaciones internas, tanto en el muro como en la losa. Pero resisten menos carga vertical, aunque por lo que se ha encontrado las diferencias entre cargas no son significativas como se esperaba.

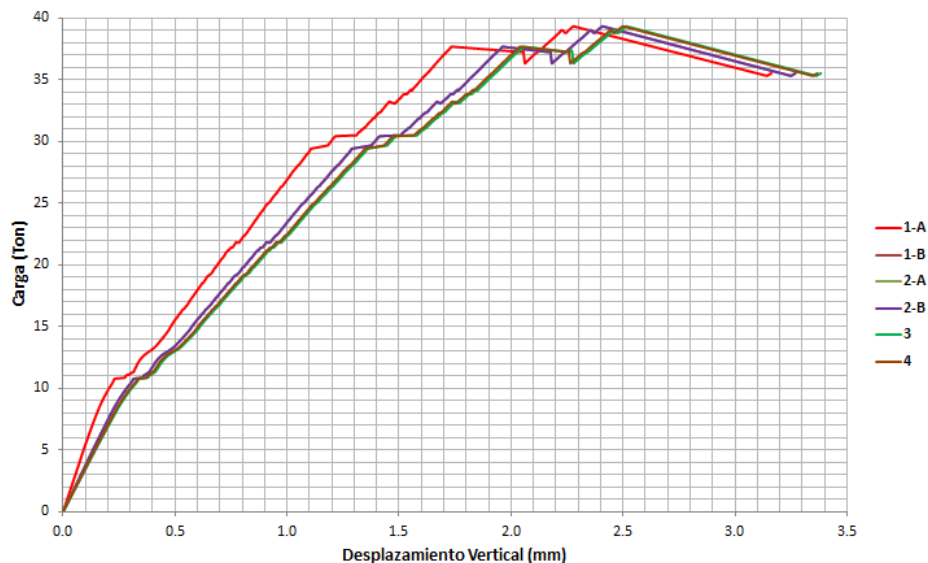


Figura 5.16 Carga Vs. Desplazamiento modelo M7_C3_13V

Un rasgo muy particular en las curvas de la *figura 5.17* es que una vez que se alcanza la carga máxima se aprecia una clara disminución de la resistencia del sistema. Esto podría ser desfavorable para la estructura, debido a que la gráfica no corresponde a una meseta

horizontal de fluencia, sino que la curva toma una suave pendiente negativa, lo que podría llevar a una falla frágil del muro o la losa.

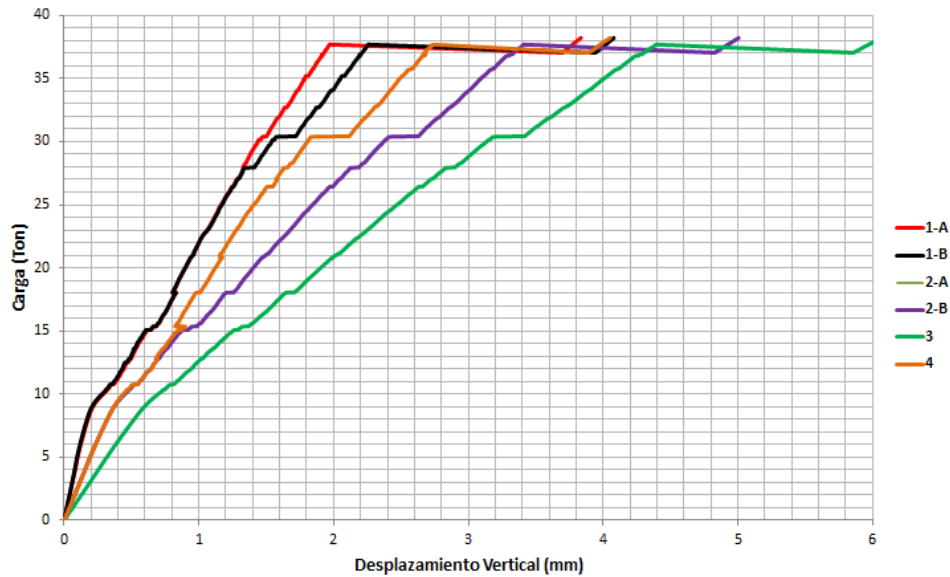


Figura. 5.17 Carga Vs. Desplazamiento modelo M8_M3_13V

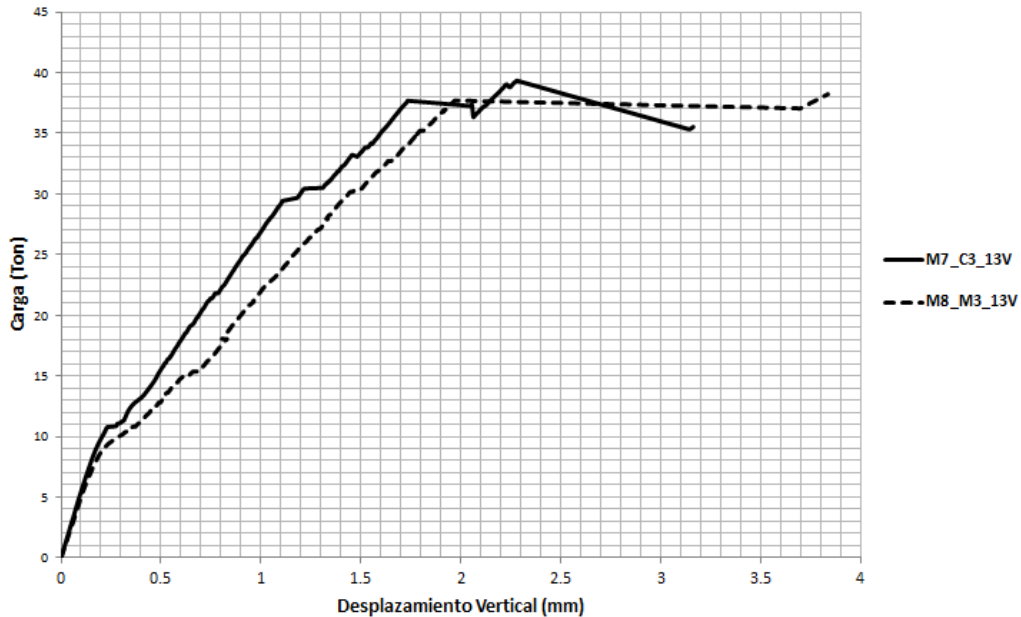


Figura. 5.18 Comparación de curvas de capacidad, Modelos M7_C3_13V y M8_M3_13V

Se destaca el hecho de que ambos modelos comienzan a perder rigidez aproximadamente a las 10 Ton de carga vertical, como muestra *figura 5.18*, que corresponde a la comparación

de las curvas de capacidad de los dos modelos. Además de ello no se aprecia gran diferencia entre la carga ultima de ambos modelos.

De los modelos estudiados en este capítulo se ha observado que a medida que el muro crece en longitud a lo largo de la losa, las deformaciones verticales en ésta tienden a disminuir, como se puede corroborar en las curvas de capacidad de los otros modelos.

Por supuesto que, como se discutió en la sección anterior, eso depende de la rigidez del muro, la losa y de la carga aplicada; también estas deformaciones en la losa podrían variar de acuerdo a la posición del muro dentro de la misma, entre otros aspectos.

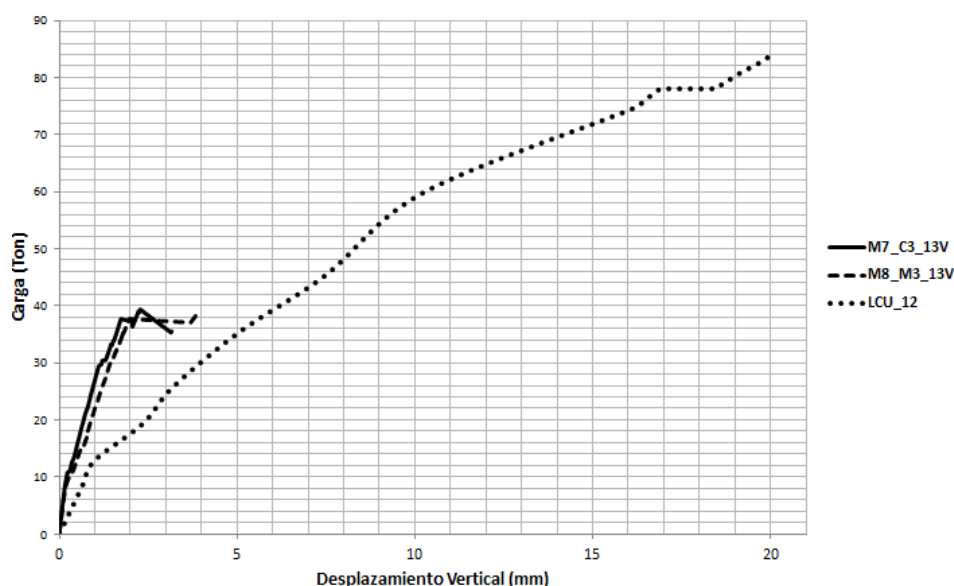


Figura. 5.19 Comparación de curvas de capacidad, Modelos M7_C3_13V, M8_M3_13V y LCU_12

La figura 5.19 muestra las curvas de capacidad de los modelos de esta sección, comparadas con el modelo LCU_12. Al igual que los analizados anteriormente, se observa gran diferencia en la capacidad de la losa, siendo la losa uniformemente cargada muy superior en capacidad. Sin embargo, cabe mencionar que la carga de esa losa es una carga equivalente, ya que al modelo se le aplicó una carga por unidad de área (*ver figura 5.2*), la cual se multiplicó por el área total, para obtener una carga equivalente en toneladas.

Las gráficas de comparación en donde se incluye el modelo LCU_12 presentadas en este capítulo son meramente ilustrativas, en vista de las diferencia en el tipo de cargas aplicadas. Sin embargo, como muestra las figuras correspondientes, el comportamiento de la losa cargada uniformemente es muy diferente al de las losas de transferencia. Hay un factor que sirve para realizar una comparación válida, es decir, los desplazamientos verticales que uno y otro modelo experimentan.

En la *tabla 5.1* se resumen los valores de las carga y desplazamiento correspondientes a las tres etapas de las curvas de capacidad de cada uno de los modelos de losa de transferencia. La primera se refiere al límite donde la curva de capacidad es aun lineal; luego se indican la carga y el desplazamiento en que inicia la primera fluencia considerable del sistema; y, finalmente, se define la carga última y su respectivo desplazamiento.

Tabla 5.1 Tabla resumen de los modelos bajo carga vertical

Modelo	Limite Rango Elástico		Primera Fluencia		Estado Ultimo	
	Carga (Ton)	Desp. (mm)	Carga (Ton)	Desp. (mm)	Carga (Ton)	Desp. (mm)
M1_C2.5_12V	7.0	0.4	28.0	3.8	28.0	5.8
M2_M2.5_12V	6.0	0.4	25.5	3.6	27.0	7.2
M3_C3_12V	9.5	0.3	29.0	1.8	34.2	7.5
M4_M3_12V	7.5	0.2	31.5	2.2	33.5	3.6
M5_C3.75_12V	41.5	0.4	--	--	--	--
M6_M3.75_12V	40.5	0.8	40.5	0.8	43.0	1.0
M7_C3_13V	11.0	0.2	37.5	1.7	35.0	3.1
M8_M3_13V	9.5	0.4	37.5	2.0	37.0	3.7

5.5 MODELOS DE LOSA CUADRADA CON MURO CARGADOS VERTICALMENTE (ANÁLISIS POR ESFUERZOS)

En la *sección 5.4* se reportó un análisis completo de los modelos basado en sus desplazamientos, generando de esa forma las curvas de capacidad en cada caso. Sin embargo en muchos casos los desplazamientos no son suficientes para entender el estado interno de los elementos de una estructura; es necesario, además, estudiar el estado de esfuerzos. Por tal razón se han seleccionado algunos de los modelos analizados en la *sección 5.4* para estimar el historial del estado de esfuerzos en puntos específicos de los modelos.

Para este propósito se analizaron los modelos M2_M2.5_12V y M4_M3_12V, ambos constituidos por muros de mampostería, en vista de que, como se verá en la *sección 5.7* es en estos casos donde se observan mayores agrietamientos en el muro. Por consiguiente, es necesario, tal como se hizo al analizar los desplazamientos, establecer puntos claves de interés para determinar su historial de esfuerzos.

5.5.1 PUNTOS DE MONITOREO DE ESFUERZOS

A continuación se presentan los puntos que serán objeto de estudios en lo que se refiere a esfuerzos. Se ha buscado analizar elementos tanto en la losa como en el muro. En el caso de la losa se estudian 6 puntos, en cinco de ellos se analizan los esfuerzos en dirección Y y en uno en

dirección X , como se muestra en forma esquemática en la *figura 5.20.a*. Para ello se han tomado elementos determinados dentro del mallado en el programa de elementos finitos y se ha determinado su historial de esfuerzos a lo largo del proceso de carga.

Los elementos 1YL, 2YLA y 3YLA se encuentran ubicados en la superficie superior de la losa, mientras que los elementos 2YLB y 3YLB se localizan en la superficie inferior de la losa. En todos los casos los esfuerzos son analizados en la dirección Y . Se hace esa diferencia con el objeto de apreciar el comportamiento de los elementos en tensión y en compresión. Por otra parte, el elemento 1XL se encuentra localizado en la parte superior de la losa y es analizado en la dirección X .

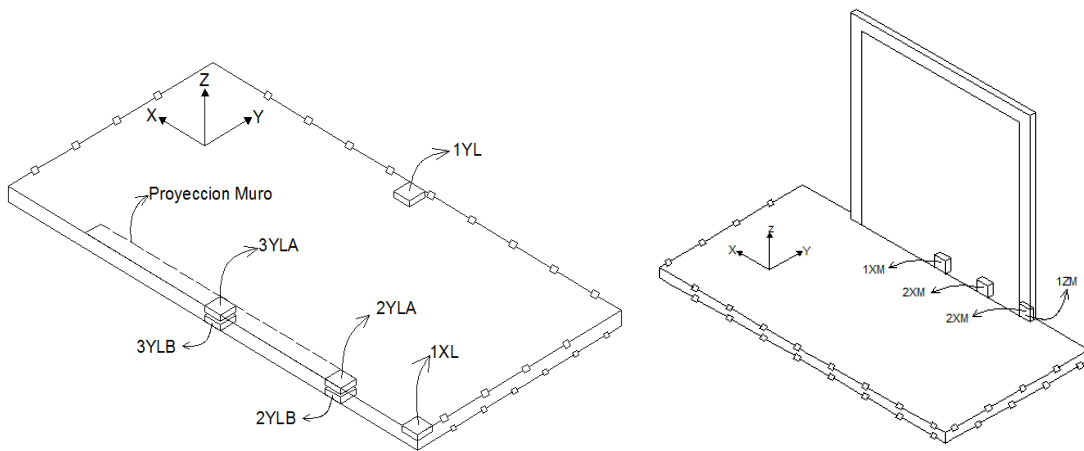


Figura 5.20 Puntos de monitoreo de esfuerzos a) en la losa b) en el muro

Además, se decidió extender este estudio al muro con el objetivo de conocer el efecto que tiene éste cuando está cimentado sobre una losa que no es totalmente rígida. Para ello se han ubicado tres puntos (1XM, 2XM y 3XM) para monitorear los esfuerzos en el sentido del eje X y uno para los esfuerzos en la dirección Z , tal como lo presenta la *figura 5.20.b*.

5.5.2 MODELO M2_M2.5_12V

Uno de los objetivos de esta sección es determinar el estado de esfuerzos de ciertos elementos dentro de la estructura durante todo el proceso de carga, con el fin de determinar si en algún momento se supera la capacidad de los materiales tanto a tensión como a compresión provocando, en el primer caso, agrietamientos y, en el segundo, aplastamiento del material. Sin embargo, es necesario aclarar que esta sección los resultados obtenidos pertenecen al historial de esfuerzos de determinados elementos finitos de concreto o de mampostería y no de una sección compuesta que incluya el acero de refuerzo.

Como su nomenclatura lo indica, este modelo está compuesto por mampostería en lo que corresponde al muro y concreto en lo referente a la losa, los castillos y la dala. Se han tomado los elementos mostrados en la *figura 5.20* como elementos simples no reforzados simplemente para determinar si en algún punto en el proceso de carga se exceden sus esfuerzos últimos.

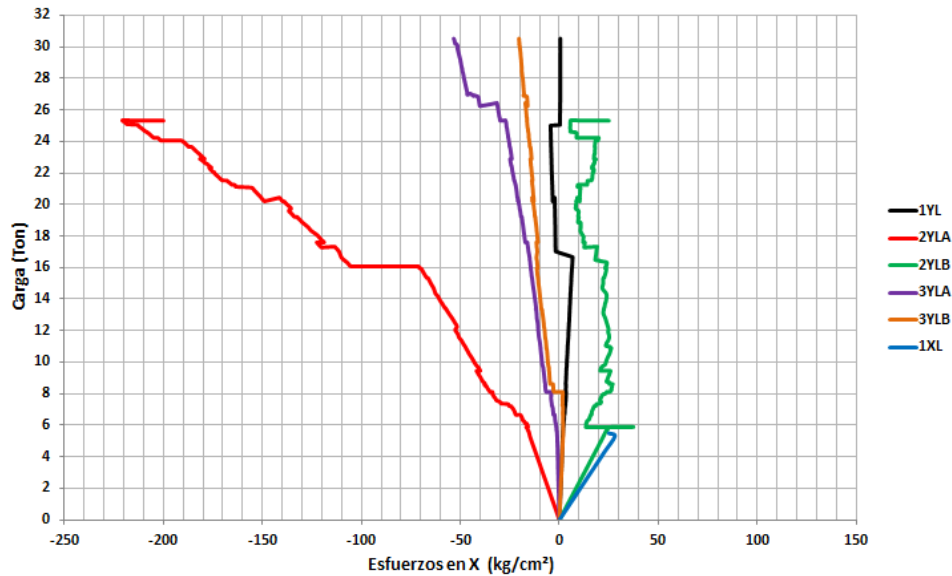


Figura 5.21 Carga vertical Vs. Esfuerzos en la losa modelo M2_M2.5_12V

La figura 5.21 proporciona algunos resultados interesantes (los esfuerzos negativos son compresiones y los positivos tensiones). Hay tres elementos cuya ubicación se supone crítica por exceder su capacidad de aplastamiento o ruptura; tales puntos son: 2YLA, 3YLB y 1XL. El primero es el punto justo al pie del castillo sobre la losa. En el punto se genera considerables esfuerzos en compresión, como lo muestra la *figura 5.21*, estando muy cerca de la resistencia a compresión considerada para el concreto (250 kg/cm^2) pudiendo llegar a fallar éste por aplastamiento en esa zona.

En los puntos 2YLB y 1XL ubicado el primero justamente debajo del castillo en la superficie inferior de la losa y el segundo en un extremo de la losa en la misma dirección del muro según lo muestra la *figura 5.20*, se observan esfuerzos de tensión que rebasan la capacidad considerada para el concreto en los modelos, que es un 10% de la resistencia a compresión en 25 kg/cm^2 , considerándose que los alrededores de este punto se encuentran agrietados.

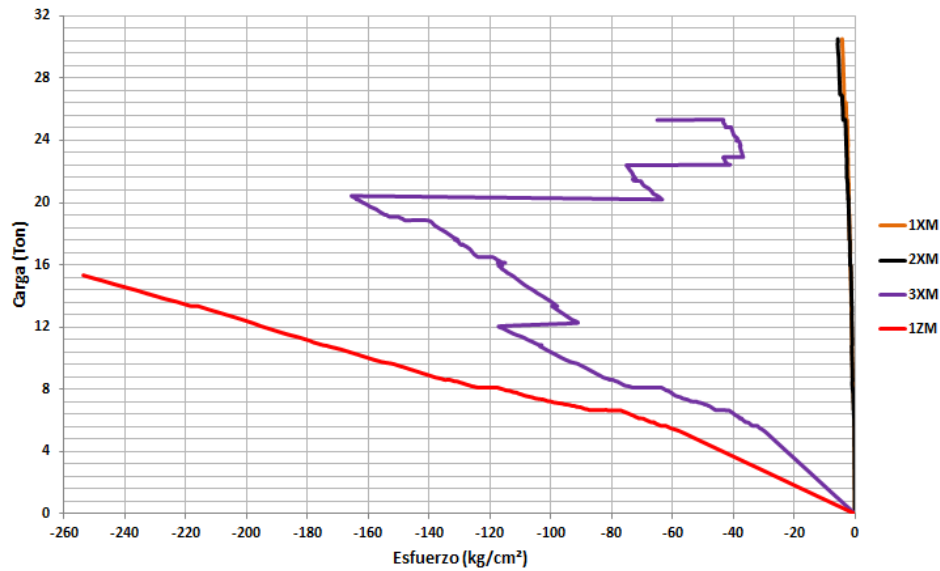


Figura 5.22 Carga vertical Vs. Esfuerzos en el muro modelo M2_M2.5_12V

Por otra parte, se hace notar que los esfuerzos en la losa al centro del claro (3YLA y 3YLB) muestran un comportamiento bastante estable, como se muestra en la *figura 5.21*.

En la *figura 5.22* se presenta el historial de esfuerzos en los puntos de monitoreo indicados en la *figura 5.20.b* del muro de mampostería. Claramente se aprecia que es en los extremos del muro donde ocurren los mayores esfuerzos llegando a sobrepasar la capacidad a compresión del concreto, como se muestra en la curva perteneciente al punto 12M. Aquí se está considerando el esfuerzo vertical de compresión en el eje Z, sin embargo también en dicho punto se presentan importantes esfuerzos de compresión en la dirección X, como lo muestra la curva del punto 3XM.

En algunas gráficas de esfuerzo, cuando un elemento rebasa su capacidad ya no se grafica más, debido a que una vez sobrepasado su límite de esfuerzo abruptamente regresa a cero y se comporta de forma inestable.

Es posible que los esfuerzos elevados que se observan en los castillos se deban al hecho de que un buen porcentaje de la carga vertical es transmitida mediante la dala hacia los castillos debido a la gran diferencia de rigidez entre el de concreto y la mampostería, mientras que un porcentaje menor es acarreado y distribuido a lo largo del muro de mampostería.

5.5.3 MODELO M4_M3_12V

Al igual que el anterior modelo, este se escogió para hacer un análisis de esfuerzos por ser de mampostería. Con respecto al modelo M2_M2.5_12V, se puede apreciar bastante similitud en la forma de las gráficas mostradas para ambos modelos; tanto en lo referente a la losa como al muro. Sin embargo vale la pena mencionar algunas diferencias, en primer lugar, se aprecia una disminución importante en los esfuerzos en el punto 2YLA; al mismo tiempo se observa un aumento considerable en los esfuerzos de tensión en el punto 1YL, según muestran las *figuras 5.22 y 5.23*.

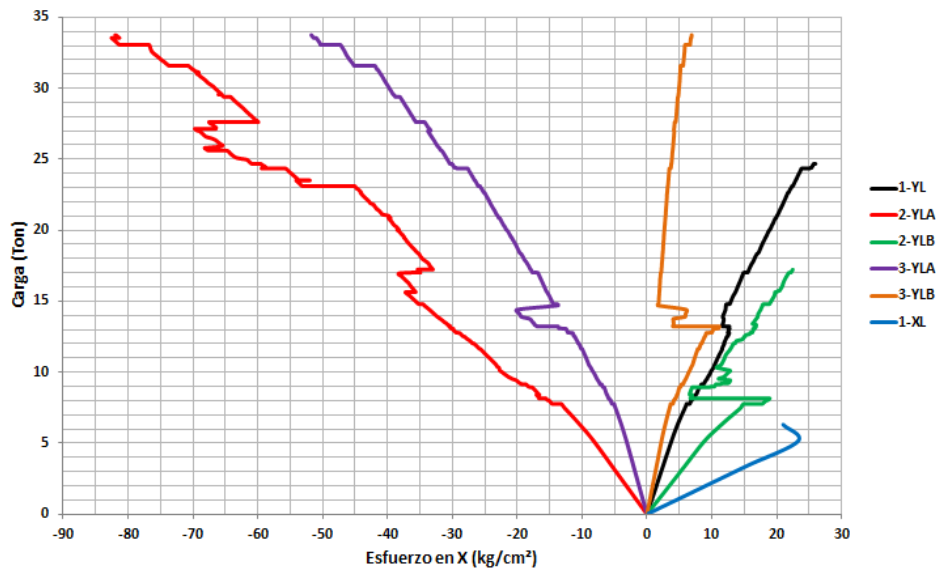


Figura 5.23 Carga vertical Vs. Esfuerzos en la losa modelo M4_M3_12V

Respecto a la diferencia observada en el punto 1YL, resulta lógico pensar que a medida que la carga se vaya orientando en un solo sentido, como sucede al ir incrementando la longitud del muro, los esfuerzos se van concentrando en puntos específicos en el área de las losa, como sus extremos, donde se generan mayores momentos negativos. Situación, contraria al caso en que se reduce la longitud de aplicación de la carga, hasta llegar a una carga puntual al centro del claro.

Tanto los esfuerzos como los momentos serían simétricos en la losa, si se considera que ésta es cuadrada, que es el caso en estudio. La figura 5.24 muestra la historia de esfuerzos en el muro. Esta tiene mucho parecido con el modelo anterior, tanto en la forma como en la magnitud de los valores. Uno de los puntos críticos está en el extremo del muro, es decir la parte baja o pie de los castillos.

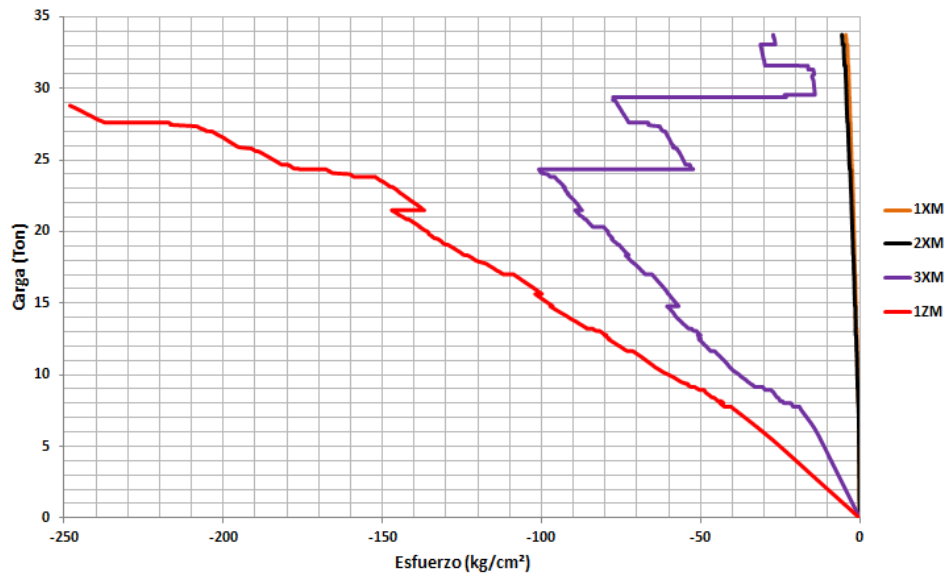


Figura 5.24 Carga Vertical Vs. Esfuerzos en el muro modelo M4_M3_12V

Las gráficas de esfuerzos mostradas resultan bastante interesantes debido si el muro se agrieta no es precisamente porque se flexione como consecuencia de las deformaciones de la losa (al centro del claro, ni el muro ni la losa presentan grandes esfuerzos, tampoco se observan excesivos desplazamientos verticales diferenciales entre el extremo del muro y su centro), en especial cuando el muro es de concreto, como se puede corroborar en las gráficas carga-desplazamiento de la *sección 5.4*.

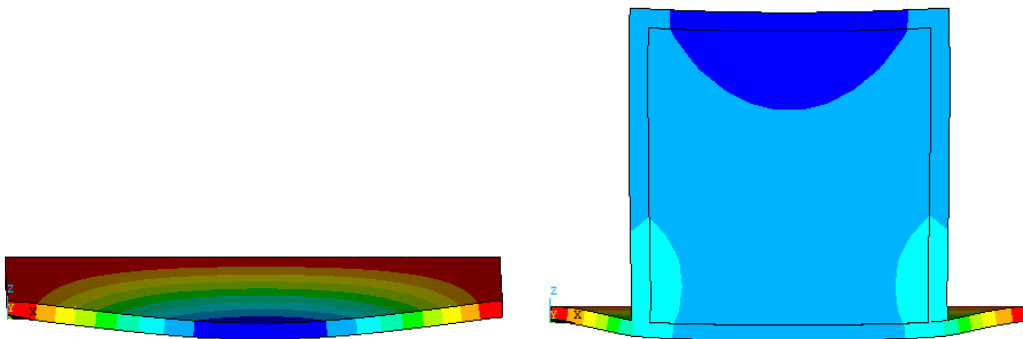


Figura 5.25 Deformadas de la losa a) Uniformemente Cargada b) Cargada a través de un muro

Lo anterior lleva a afirmar que el agrietamiento en esa zona será menor; esto es debido a la mayor rigidez a flexión del muro. Al aplicarse carga a la losa a través del muro, deforma la losa en forma trapezoidal, como se muestra en la figura 5.25.b y no en forma parabólica como convencionalmente se deforma una losa uniformemente cargada.

5.6 COMPARACIÓN DE LAS CURVAS DE CAPACIDAD DE LOS MODELOS ANALIZADOS BAJO CARGA VERTICAL

En la sección 5.4 se mostraron comparaciones de las curvas de capacidad de modelos geoméricamente idénticos que diferían entre sí en el tipo de material asignado al muro únicamente. En esta sección se presentan comparaciones de las curvas de capacidad de todos los modelos, primero por material del muro y después todos en conjunto.

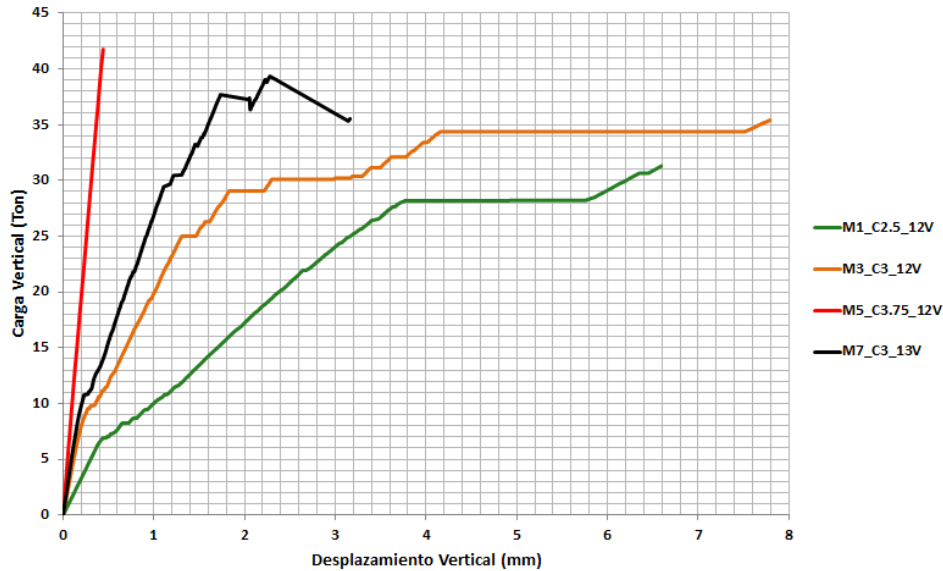


Figura. 5.26 Curvas de capacidad de los modelos con muro de concreto

La *figura 5.26* compara las curvas de capacidad de los modelos con muros de concreto, se pueden notar varios aspectos interesantes; en primer lugar, a medida que la longitud del muro crece, el sistema, en general, se rigidiza cada vez más alcanzando una mayor capacidad de carga. Además, como es de esperarse, entre más rígido es el sistema tiende a fluir, a mayor carga pero con un menor desplazamiento vertical.

Por otra parte, la excepción del modelo M3_C3_12V, se puede notar que entre mayor sea la longitud del muro se obtienen curvas de capacidad que experimentan menores deformaciones verticales, como lo muestra la *figura 5.26*.

En la *figura 5.27* se representan las curvas de capacidad para los modelos con muros de mampostería. Al igual que en la *figura 5.26* se distingue una marcada tendencia al aumento de la rigidez de la estructura, de manera proporcional al incremento en la longitud del muro, esta misma forma dicha proporcionalidad sigue siendo válida con respecto a la capacidad de carga total del sistema.

En el caso de los modelo con muro de mampostería resulta más evidente que la primera fluencia significativa del sistema ocurre cada vez a mayor carga, pero a menor desplazamiento a medida que la longitud del muro se va acrecentando.

Es importante mencionar que en ambas figuras (5.26 y 5.27) las estructuras comienzan a perder rigidez a diferentes niveles de carga. De hecho, en los modelos M5_C3.75_12V y M6_M3.75_12V no se observa perdida alguna de rigidez, en el segundo apenas lo hace, pero a una carga bastante elevada en comparación con los demás modelos. Sin embargo se debe mencionar que las curvas mostradas para estos dos modelos posiblemente no sean completas ya que en los modelos de elementos finitos para estas estructuras, aunque se les aplicaran cargas más elevadas de las alcanzadas en sus respectivas curvas de capacidad, dichos modelos no llegaban a converger en los últimos pasos de carga. Por tanto es muy probable que todo el sistema en si posea mayor capacidad de carga que la mostrada y que en alguna carga mayor se generen mesetas de fluencia.

También se presenta una gráfica que engloba las curvas de capacidad de todos los modelos generados en este capítulo, independientemente del material asignado al muro, la longitud de éste y el espesor de la losa, la que se presenta en la *figura 5.28*.

Uno de los aspectos de gran importancia que se debe destacar de las curvas mostradas, y que hasta este momento no se ha mencionado, es el impacto, tanto en la capacidad de carga como en la capacidad de deformación de la losa, que se observa al aumentar tan solo un centímetro el espesor de la losa. Las figuras (5.26, 5.27 y 5.28) muestran una clara superioridad en capacidad de carga de los modelos M7_C3_13V y M8_M3_13V con respecto a los modelos M3_C3_12V y M3_M4_12V, respectivamente, cuya diferencia es un centímetro más en espesor de la losa.

En el caso de la capacidad de deformación ocurre lo inverso. Los modelos con losas de 12 centímetros de espesor se deforman más que sus semejantes de 13 centímetros de espesor.

Otro aspecto que se debe hacer notar es la ventaja en capacidad de carga que tienen en general los modelos con muros de concreto con respecto a los que tienen muros de mampostería. Sin embargo como muestran las gráficas dicha ventaja no es tan marcada. También, aunque no en gran medida, los modelos de mampostería resultan ser superiores en deformaciones verticales que los de concreto.

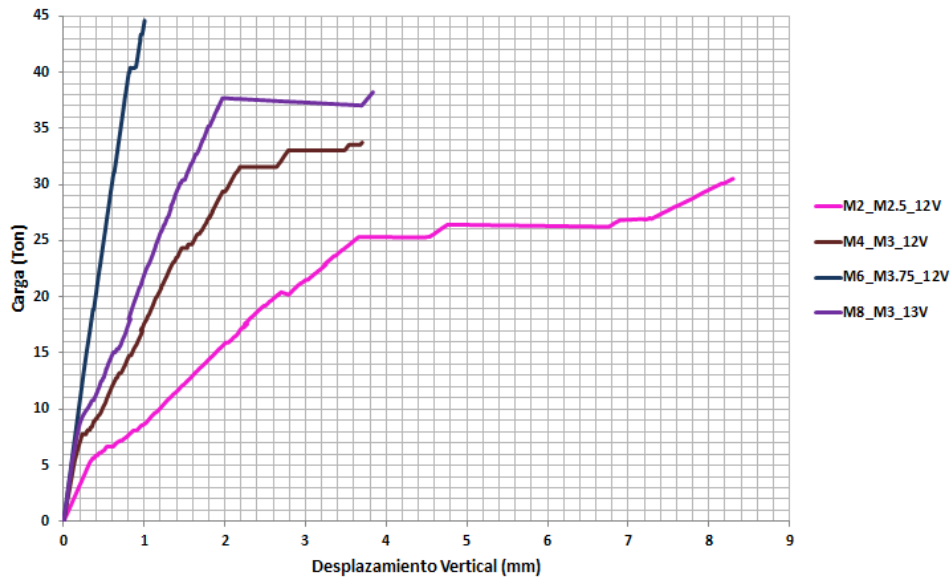


Figura. 5.27 Curvas de capacidad de los modelos con muro de mampostería

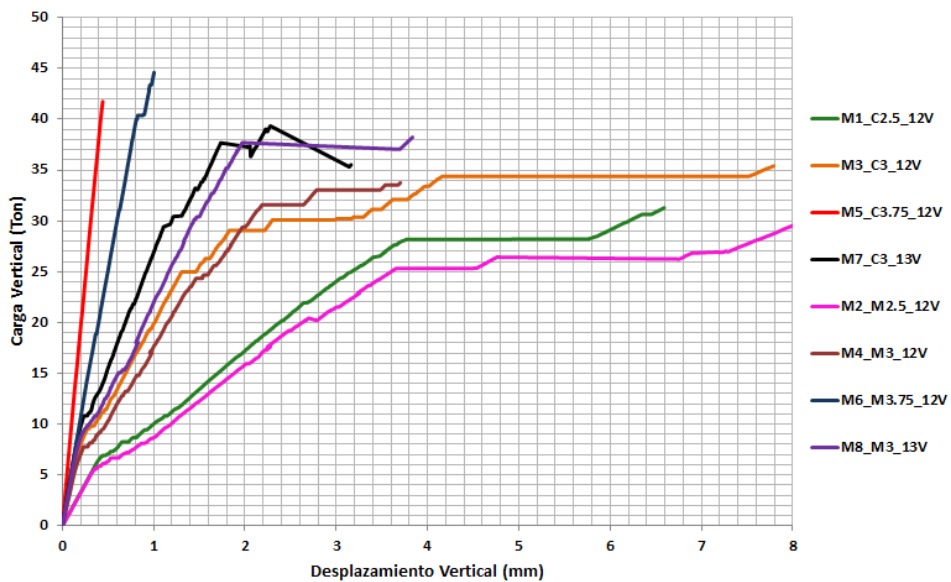


Figura. 5.28 Comparación de las curvas de capacidad de todos los modelos

5.7 REVISIÓN DE AGRIETAMIENTOS

Otro de los puntos de interés en este estudio es determinar los patrones de agrietamiento bajo carga vertical, tanto en la losa como en el muro. El objetivo es establecer qué zonas dentro de la estructura analizada resultan más críticas durante el proceso de carga. Por tanto en esta sección se presenta el análisis del estado último de agrietamiento para los ocho modelos analizados con carga vertical.

5.7.1 AGRIETAMIENTO EN LA LOSA

En las Figuras 5.29 a 5.37 se presentan los diagramas y patrones de agrietamiento de los modelos analizados en su estado último de carga, obtenidos del programa de elementos finitos y presentados en forma esquemática, ya que al ser extraídas directamente del programa puede ser un poco más difícil apreciar los patrones, especialmente si se requiere valorar el agrietamiento en la parte superior y en la zona inferior de la losa por separado. Primero se representa el patrón de agrietamiento de la losa cargada uniformemente y luego se hacen las comparaciones y comentarios respectivos.

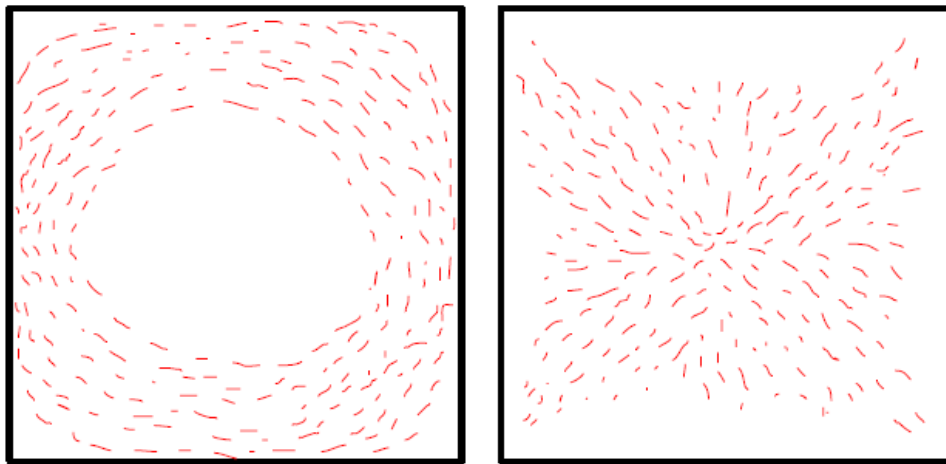


Figura 5.29. Patrón de agrietamiento en la losa LCU_12, cara superior (Izq.), cara inferior (Der.)

El patrón de agrietamiento de la *figura 5.29* tiene una forma bien conocida y estudiada tanto analítica como experimentalmente. Da una idea de las diferencias en el daño sufrido por la losa de acuerdo al tipo de carga soportada y difiere, en gran medida, en su forma en algunos casos como los estudiados en esta tesis.

Las figuras 5.30 y 5.31 muestran, esquemáticamente, el agrietamiento en los dos modelos con muros de 2.50 metros de longitud. Como se observa a primera vista no se aprecia una diferencia significativa entre ambas gráficas; no obstante se pueden mencionar un par de diferencias. La primera es que en el modelo con muro de concreto (M1_C2.5_12V) la losa sufre mayor daño al pie de los castillos (dicho daño es representado a través de pequeños círculos) y la segunda es que en el modelo M2_M2.5_12V la cara inferior de la losa muestra un agrietamiento más disperso, probablemente debido al hecho de que la losa de este modelo se deforma más. Además de ello el daño no está muy concentrado.

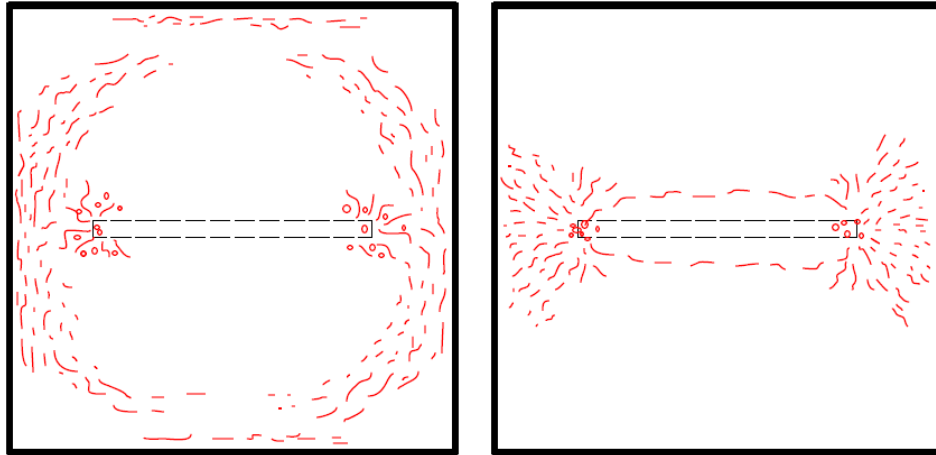


Figura 5.30. Patrón de agrietamiento en la losa M1_C2.5_12V, cara superior (Izq.), cara inferior (Der.)

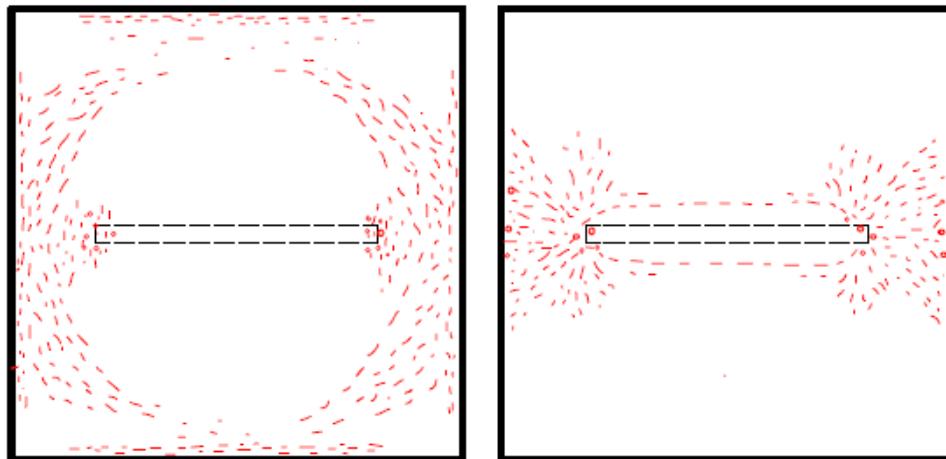


Figura 5.31 Patrón de agrietamiento en la losa M2_M2.5_12V, cara superior (Izq.), cara inferior (Der.)

Respecto a los agrietamientos mostrados en las figuras 5.32 y 5.33, los patrón varían poco respecto a los dos primeros modelos. Sin embargo, se debe resaltar el hecho de que la zona que corresponde al espacio entre el extremo del muro y el borde de apoyo de la losa sufre bastante daño, especialmente en la cara inferior de la losa. Se puede decir que, a medida que el muro se acerca al borde de la losa pero sin llegar a él, el agrietamiento en el área circundante de los extremos del muro se incrementa.

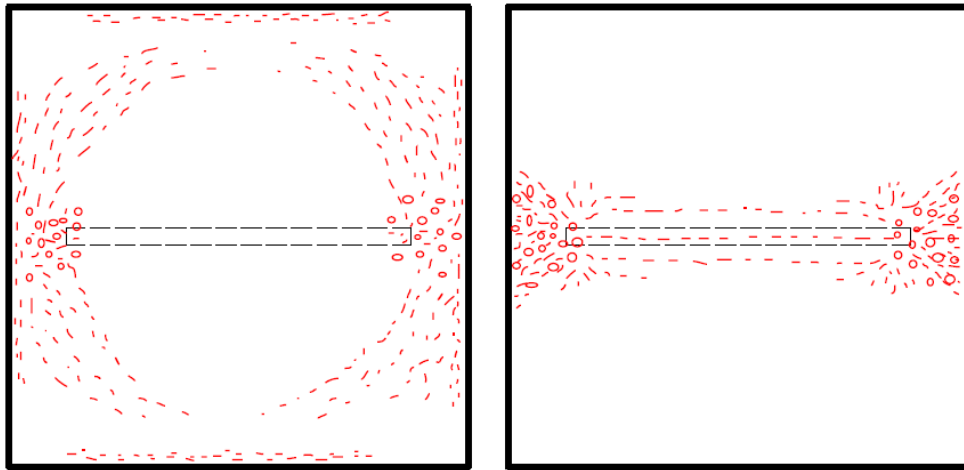


Figura 5.32 Patrón de agrietamiento en la losa M3_C3_12V, cara superior (Izq.), cara inferior (Der.)

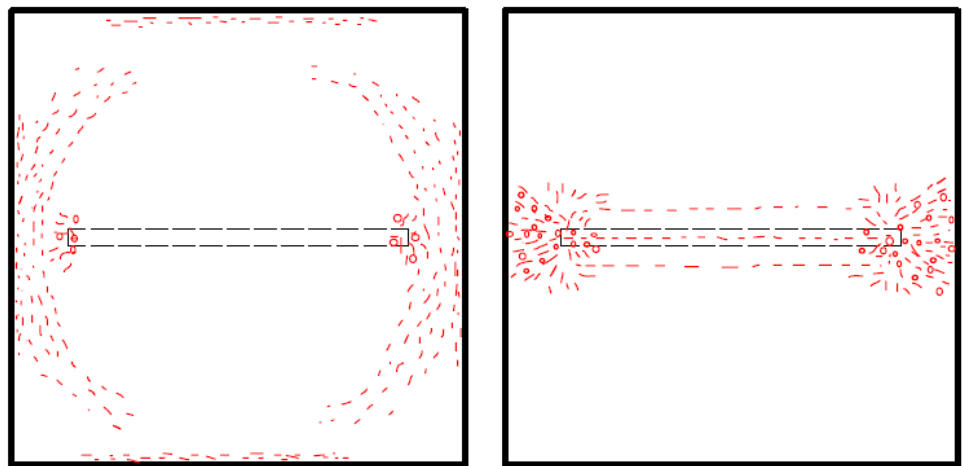


Figura 5.33 Patrón de agrietamiento en la losa M4_M3_12V, cara superior (Izq.), cara inferior (Der.)

Como se mencionó en el *Capítulo 4*, el elemento finito utilizado para modelar el concreto (*SOLID 65*) es capaz de agrietarse, lo que ocurre cuando se superan las superficies de fluencia definidas para tal elemento. Además, se indicó que este elemento tiene la particularidad de poder agrietarse en sus tres ejes principales. Por tanto, los pequeños círculos mostrados en las figuras 5.30 a 5.37 representan los elementos que se agrietaron en al menos dos de sus ejes principales.

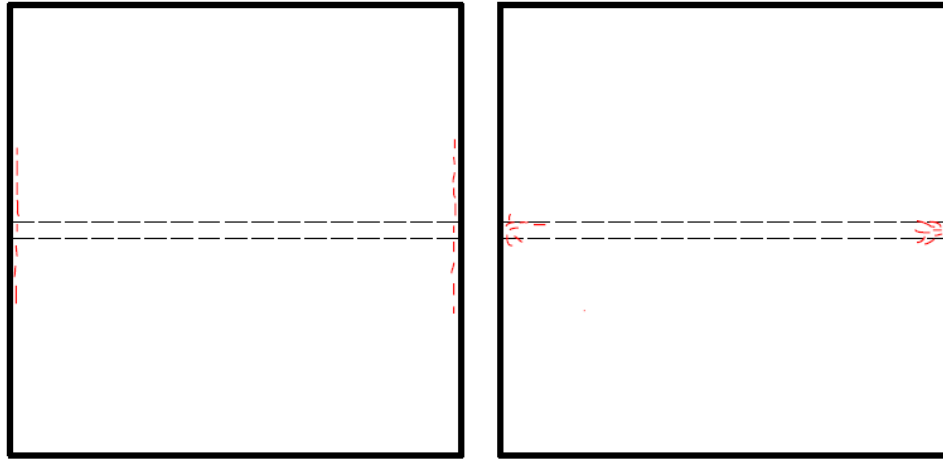


Figura 5.34 Patrón de agrietamiento en la losa M5_C3.75_12V, cara superior (Izq.), cara inferior (Der.)

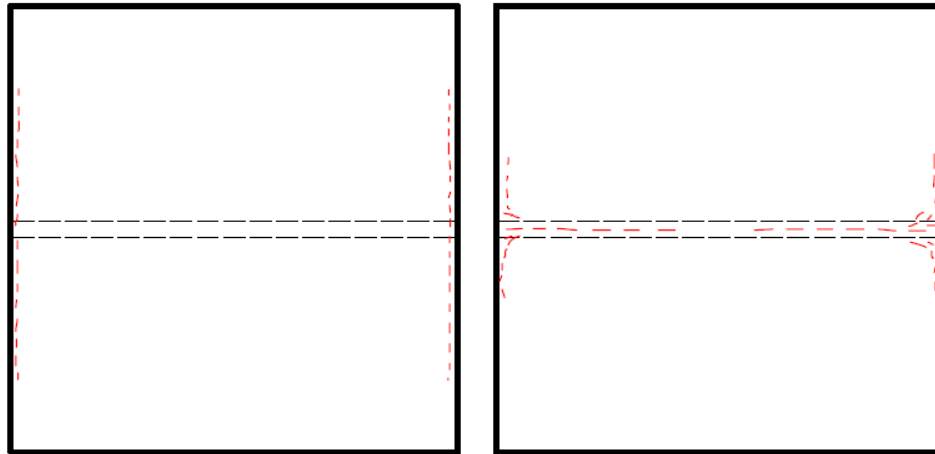


Figura 5.35 Patrón de agrietamiento en la losa M6_M3.75_12V, cara superior (Izq.), cara inferior (Der.)

Si observamos las figuras 5.34 y 5.35, se nota que prácticamente la losa no sufre daño de consideración. En vista de que el muro cruza de lado a lado la losa, apoyando sus extremos en los bordes de la misma, éste actúa como si fuese una viga muy peraltada, como ya se había señalado. Es por esta razón que la losa se encuentra en muy buen estado al final de la carga última aplicada aun cuando que dicha carga vertical es considerablemente mayor que la aplicada a los demás modelos, como se puede observar en la gráfica de la figura 5.15.

Comparando los patrones de las figuras 5.34 y 5.35 se puede comprobar el efecto de la rigidez del muro. En el modelo de muro de concreto (que es muy rígido) éste absorbe toda la carga. Lo cual no permite que la losa sufra deflexiones importantes. Mientras que el modelo de la figura 5.35, el cual es menos rígido debido al uso de la mampostería la losa, si sufre algún agrietamiento, aunque no excesivo.

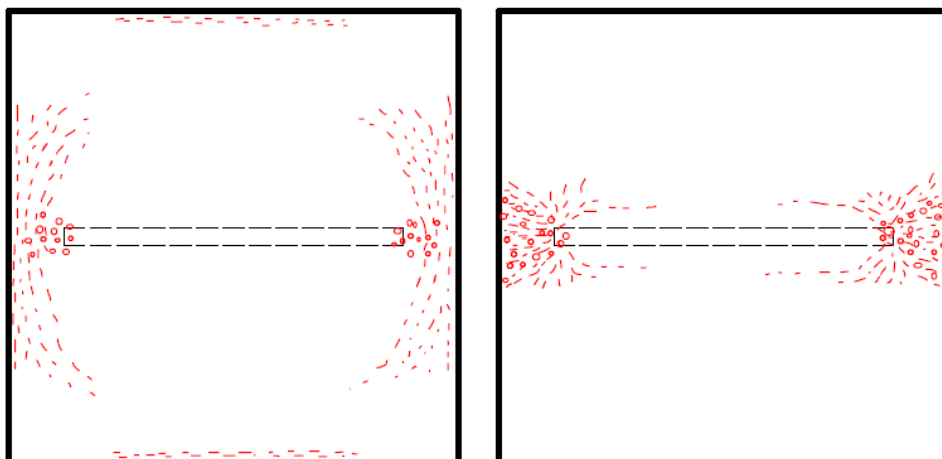


Figura 5.36 Patrón de agrietamiento en la losa M7_C3_13V, cara superior (Izq.), cara inferior (Der.)

De las figuras 5.36 y 5.37, las que representan los modelos con losa de 13 centímetros, se destaca el hecho de que aunque el patrón de agrietamiento es muy parecido a de los modelos M3_C3_12V y M4_M3_12V, la intensidad del agrietamiento en el área de la losa resulta ser menor, lo cual es un efecto directo de su mayor peralte.

Otro aspecto de gran relevancia que se observa en todos los modelos, excepto en M5_C3.75_12V y M6_M3.75_12V, es que muestran un patrón de agrietamiento por punzonamiento en la losa provocado por el muro, el cual se observa como grietas paralelas al muro que culminan en los castillos de los extremos del mismo.

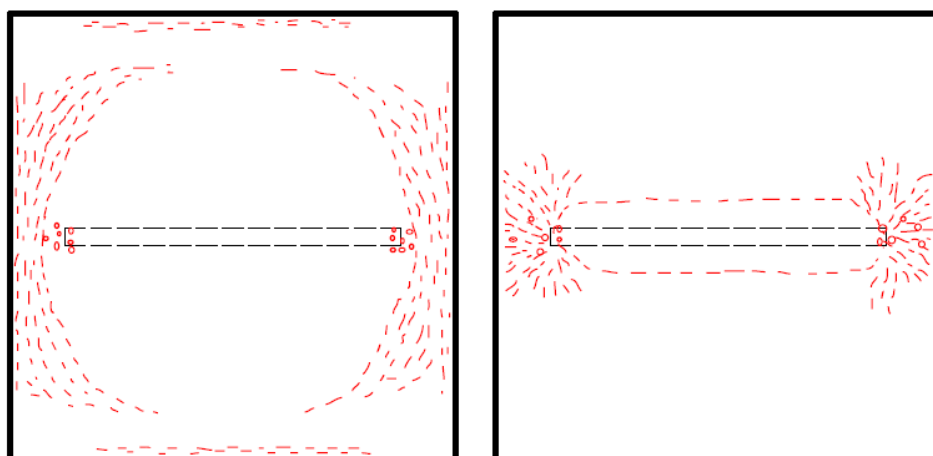


Figura 5.37 Patrón de agrietamiento en la losa M8_M3_13V, cara superior (Izq.), cara inferior (Der.)

5.7.1.1 CORTANTE POR PENETRACIÓN

En las figuras 5.30 a 5.33 y 5.36 a 5.37, es notorio el hecho de que la losa se ve sometida a esfuerzos cortantes por penetración, mostrándose estos como fisuras paralelas al muro y separadas a cierta distancia del mismo. La carga por cortante que puede resistir el concreto de la losa está dada por la siguiente expresión, que se encuentra en el ACI-318-08:

$$V_c = 0.53\sqrt{f'_c}b_wd \quad (5.2)$$

donde:

f'_c = Resistencia a compresión del concreto

b_w = ancho de la sección

d = peralte efectivo de la sección

Si se desea obtener el cortante por unidad de longitud para la losas de 12 cm de peralte se tiene que:

$$V_c = 0.53\sqrt{f'_c}d = 0.53x\sqrt{250x}(12 - 2) = 83.80 \text{ kg/m}$$

Igualmente se obtiene que para la losa de 13 cm el cortante por unidad de longitud es 92.18 kg/m. La cuarta columna de la tabla 5.1 muestra la carga vertical a la primera fluencia. Si se divide esa carga por la longitud del muro se obtiene la carga por unidad de longitud. Si se comparan esos valores con los obtenidos en este apartado se tiene que los primeros son mayores, por lo cual, se deduce que el agrietamiento por penetración ya ha ocurrido a la primera fluencia continua hasta obtenerse los patrones mostrados en la sección 5.7.1.

5.7.2 AGRIETAMIENTO EN EL MURO

Al igual que en la sección anterior, en ésta se describe el agrietamiento observado en los muros de los modelos estudiados. A diferencia de los esquemas de agrietamiento en las losas, aquí se presentan las formas de agrietamiento extraídas directamente de ANSYS. Las pequeñas rayas dentro de los elementos representan las grietas de igual forma el sentido de dichas de estas indican en qué dirección se está agrietando el elemento.

Contrario a lo observado en las losas, donde los patrones de grietas son muy parecidos sin importar si el muro es de concreto o mampostería, en los muros la diferencia de material si es relevante. En las figuras 5.38 a 5.41 se presentan en pares los muros, de acuerdo a su longitud y el espesor de la losa.

Se puede distinguir muy bien la diferencia en el comportamiento de los muros de concreto con respecto a los de mampostería, donde los primeros se agrietan sustancialmente menos que los últimos. Sin embargo, esa diferencia en la cantidad de grietas no se ve traducida en un

aumento en la capacidad a carga vertical del sistema, o al menos no se observa gran diferencia, como se comentó en la *sección 5.4*.

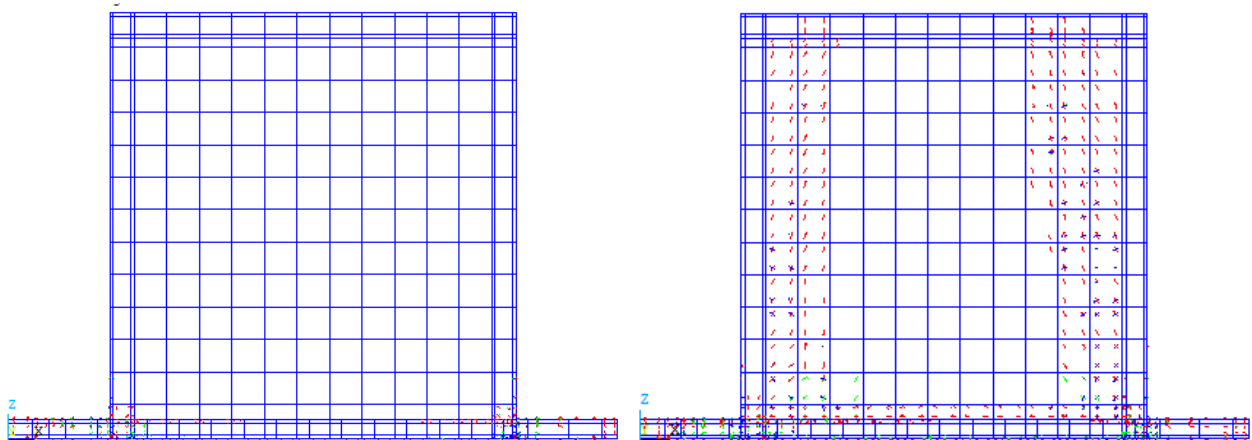


Figura 5.38 Agrietamiento en los muros M1_C2.5_12V (Izq.), M2_M2.5_12V (Der.)

Por otra parte, se observa que, a medida que el muro va aumentando de longitud, va disminuyendo su rigidez a flexión, siempre y cuando la longitud total de éste no sea igual a la del claro de la losa. Esto puede observarse al comparar los muros de las figuras 5.38 y 5.39, en donde el muro de 3 m de longitud está considerablemente más agrietado que el de 2.5 m, sobre todo cuando ambos son de mampostería.

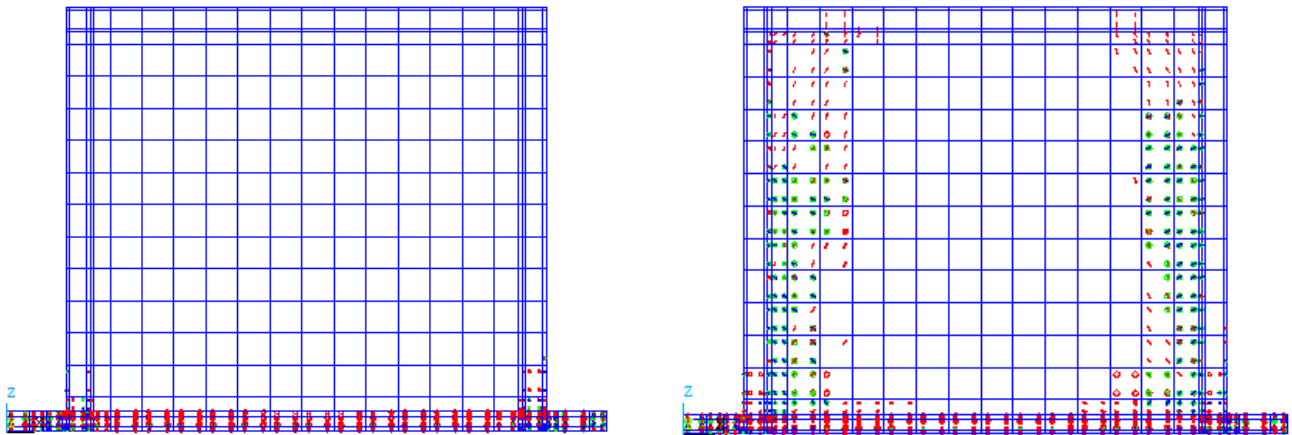


Figura 5.39 Agrietamiento en el muro M3_C3_12V (Izq.), M4_M3_12V (Der.)

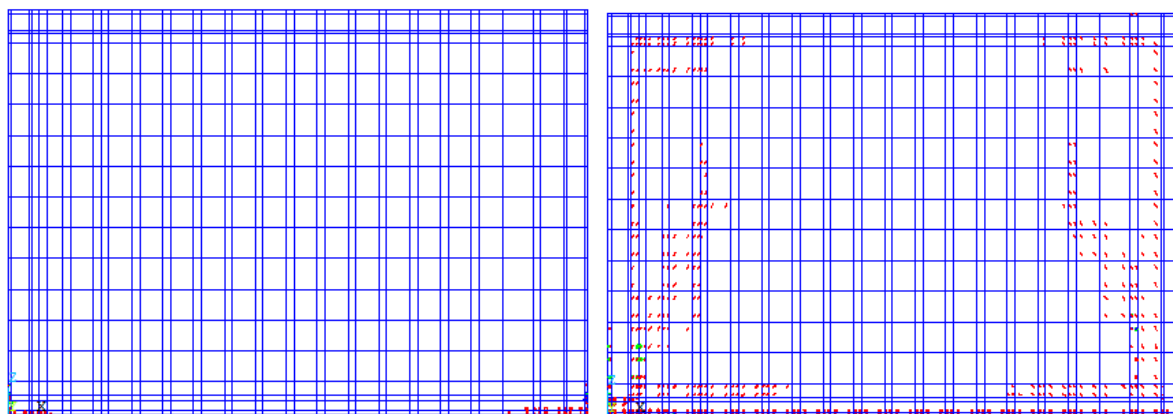


Figura 5.40 Agrietamiento en los muros M5_C3.75_12V (Izq.), M6_M3.75_12V (Der.)

También se observó que el agrietamiento en los muros puede provenir de dos fuentes principales. La primera por la flexión propia del muro sumada a la de la losa. La segunda no menos importante y con más efecto en los muros de mampostería, es la deformación que sufren los castillos arqueándose hacia los extremos producto de la carga vertical. En este sentido el buen confinamientos del muro es importante.

Debe señalarse que, en los modelos con muro de mampostería predomina el agrietamiento debido a la deformación de los castillos, a excepción del modelo M6_M3.75_12V, en el cual tanto la flexión de la losa como la deformación de los castillos son importantes.

Lo anterior se ilustra en la *figura 5.25.b*, donde el muro no se flexiona lo suficiente para agrietarse, lo cual debería manifestarse en su parte inferior; aquí, más bien rige el agrietamiento por deformación de los castillos confinantes. Esto es más evidente en los modelos con muro de mampostería, por lo que se observan grietas en toda la altura del muro, cercanas a los castillos de confinamiento. El punto aquí radica en que el muro deforma a la losa y no al contrario, en vista de que el primero se desplaza verticalmente como cuerpo rígido. Esto está más a la vista en los modelos con muros de concreto que prácticamente no sufren daño alguno.

Finalmente, el espesor de la losa, del cual depende su rigidez, juega un papel relevante, como se puede apreciar al comparar las grietas de los modelos de la figuras 5.39 y 5.41. Si bien es cierto que la extensión de las grietas a lo largo y ancho del muro son casi idénticas, difieren en gran medida en su magnitud siendo más anchas en el modelo M4_M3_12V que en el M8_M3_13V. En el primero se observa que los elementos ya se han agrietado en más de uno de sus planos principales.

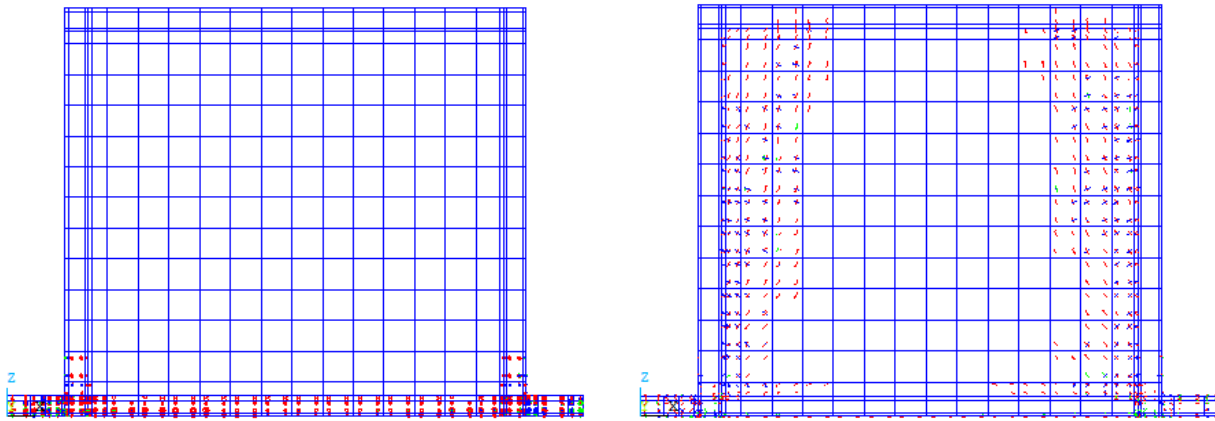


Figura 5.41 Agrietamiento en el muro M7_C3_13V (Izq.), M8_M3_13V (Der.)

5.8 DISCUSIÓN

En el estudio se pudo observar la gran diferencia que existe en el comportamiento de una losa cargada uniformemente con la de un sistema losa-muro, ese contraste se hace más notable a medida que se incrementa la carga en el muro. Según las diferentes gráficas comparativas, el modelo de losa con carga uniforme resiste un valor de la carga muy grande en comparación con la equivalente del modelo del muro, para alcanzar su capacidad última. Esta diferencia se manifiesta también en los desplazamientos.

Con excepción de los modelos con muros de 3.75 metros de longitud (figuras 5.26 y 5.27) tanto en los modelos de concreto como en los de mampostería se observan tres fases bien definidas en su comportamiento ante carga vertical: la primera es una fase elástica lineal creciente; en la segunda fase ocurre una pérdida de rigidez inicial en donde la estructura sigue siendo capaz de soportar carga vertical; finalmente, existe una tercera fase en donde se muestran pequeñas mesetas de fluencia en el sistema, hasta llegar a una carga final, indicada por una meseta de en a que la losa se encuentra severamente dañada.

Como se mostró en las figuras 5.26 y 5.27, el comportamiento del sistema puede ser mejorado en capacidad de carga al aumentar el espesor de la losa.

Los patrones de agrietamiento de la losa en el estado último de carga pueden dar guías útiles acerca de las zonas críticas de la losa que requieren atención especial en el diseño y refuerzo adicional, para evitar problemas de agrietamiento excesivo. En todos los modelos se observaron severos agrietamientos y aplastamientos en la losa, específicamente en las zonas cercanas a los extremos de los muros, cuando se alcanzó el estado final de carga.

Respecto al agrietamiento observado en los muros analizados, durante la condición final de carga se detectaron aplastamientos del concreto al pie de los extremos de los muros.

De manera particular, en los muros de mampostería se pudieron identificar varias fuentes de agrietamiento ante carga vertical; una de ellas es el grado de confinamiento que tenga el muro. Entre menor sea este, mayor será su agrietamiento. También se puede mencionar la sobrecarga que pueda soportar el muro más allá de su capacidad. Cuando el muro no posee un confinamiento adecuado provoca que los castillos tiendan a abrirse hacia afuera fisurándolo.

No se detectaron fisuras de consideración en los muros de mampostería debido a las deformaciones diferenciales verticales. Sin embargo, existe una condición que no ha sido estudiada en este capítulo, pero si se hizo en el *Capítulo 3* y es el hecho tener distorsiones y cortantes en los muros debido a carga vertical únicamente.

Esta situación se presenta cuando se tiene un muro en el cual uno de sus extremos se apoya en los bordes de la losa, o es continuo, y el otro extremo termina en algún punto dentro de la losa, sobre todo si dicho extremo se localiza entre 0 a $0.5L$, donde L es la longitud libre de la losa.

CAPITULO 6

Análisis no Lineal con Elementos Finitos de Modelos Muro-losa ante Carga Vertical y Carga Lateral

6.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se estudió, a través de varios modelos, el comportamiento de un panel aislado al cual se transfería carga vertical directamente a través de un muro (de concreto o de mampostería confinada). Los modelos se estudiaron bajo ciertas variantes, como longitud del muro, espesor de losa, magnitud de carga, entre otros. Todos los modelos fueron sometidos a carga vertical hasta lograr la falla de la estructura.

En este capítulo se han tomado los mismos modelos analizados en el capítulo 5, pero se les sujeta a un patron de cargas distinto. En este caso se les aplica una carga vertical de servicio, acuerdo a las curvas de capacidad obtenidas en el capítulo anterior, de manera que el sistema observara aun un comportamiento elástico lineal.

Además de la carga vertical de servicio se aplica al muro una carga lateral muy parecida a un “push over”, en vista de que dicha carga es aplicada en un solo sentido y en forma incremental. De esta forma se obtiene la curva de capacidad de la estructura analizada, estableciendo puntos de monitoreo de desplazamientos verticales y horizontales en las zonas de más interés. También se analizaron seis modelos de los muros sometidos a carga lateral. Sin embargo, la gran diferencia radica en que los muros fueron modelados sobre base rígida y no sobre la losa de transferencia. Esto se hizo con el fin de realizar las comparaciones en el desempeño de ambos sistemas sometidos a carga lateral.

6.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS ANALIZADOS

Los modelos de losa de transferencia utilizados en este capítulo, además de las diferencias en la magnitud y el tipo de cargas aplicadas, difieren en otros aspectos geométricos y de restricciones de movimiento de los analizados en el *capítulo 5*, los cuales serán descritos en esta sección.

Como se observa en la *figura 6.1*, la principal diferencia radica en la inclusión de una losa rígida en la parte superior del muro de carga. Dicha losa cumple con varios propósitos; el primero es

para simular la losa de entrepiso que se construye en la parte superior del muro. Esta tiene un gran efecto en el comportamiento estructural del muro, lo que se hizo evidente al analizar modelos bajo carga lateral sin dicha losa en donde los resultados no fueron satisfactorios. Además, generalmente en la práctica, al analizar sísmicamente un edificio, las fuerzas laterales se aplican a los diafragmas horizontales o sistemas de piso, en vez de ser aplicadas directamente a los muros. Por tal motivo se aplicó la carga lateral en la losa rígida en forma de presión como se aprecia en la figura 6.1.

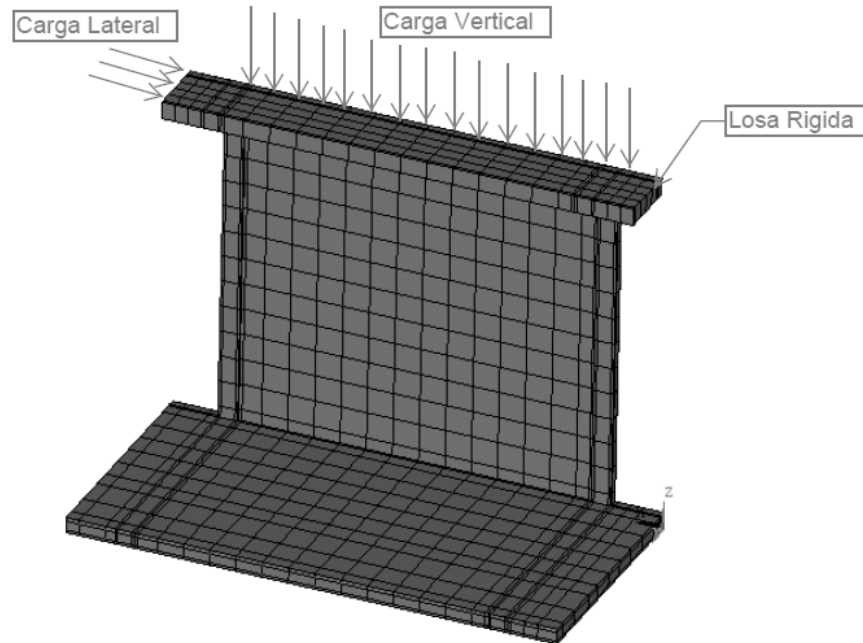


Figura 6.1 Esquema de los modelos analizados bajo carga combinada

Por otra parte, en algunos modelos analizados sin losa rígida sobre el muro de carga se observó que al aplicar la carga lateral directamente en una esquina superior del muro, la dala superior del mismo se deformaba en doble curvatura. Esto no sucedería en un edificio en donde se suponen que los sistemas de pisos funcionan como diafragmas rígidos. Este efecto se elimina al asignar una gran rigidez a la dala o agregando una estructura adicional al muro, como una losa rígida. Aquí se optó por la segunda opción en vista, de que la primera hubiese sido menos representativa del comportamiento global del muro ante carga lateral.

Respecto a la aplicación de las cargas, se dispuso que ésta tuviese una secuencia y no que ambas cargas se aplicaran de manera simultánea. Por lo tanto, inicialmente se aplica gradualmente la carga vertical en forma de presión concentrada en los elementos que ocupan la franja del muro, como muestra la figura 6.1. Esta carga es tal que el sistema total se encuentra al límite, o muy cerca, del rango elástico lineal, según las curvas de capacidad presentadas en el capítulo 5.

Una vez que la carga vertical total ha sido aplicada finaliza la primera parte del proceso, dando lugar a la fase siguiente de carga. En este punto el programa se reinicia con un estado de esfuerzos y deformaciones ocasionadas por la aplicación de la carga vertical. Esto es que antes de imponer la carga lateral el sistema ya se encuentra deformado por las cargas verticales, como comúnmente ocurre en cualquier edificio.

Automáticamente al finalizar la primera fase, la carga lateral es impuesta al sistema en forma incremental y monotónica, en forma de presión en la losa rígida superior, hasta llevar a la falla la estructura.

Esta secuencia debe ser cuidadosamente programada en el archivo de datos de entrada del programa en vista de que, además de las cargas, deben ser aplicados varios tipos de restricciones de movimiento. Por ejemplo, durante la aplicación de la carga vertical además de las restricciones en los apoyos de los bordes de la losa, se deben generar restricciones de movimiento para impedir que el muro experimente desplazamientos laterales y fuera de su plano. Una vez que se termina el proceso de carga vertical, los datos de entrada se programan de tal forma que las restricciones que impiden los desplazamientos laterales son eliminadas, para permitir que la carga lateral deforme lateralmente el sistema.

De la misma forma se generan restricciones laterales para que la losa rígida en la parte superior del muro no rote al aplicar la carga vertical.

6.3 PUNTOS DE MONITOREO DE DESPLAZAMIENTO

Al igual que en el capítulo anterior, se establecieron puntos clave de control y monitoreo de la estructura para obtener información. La *figura 6.2* muestra los puntos de monitoreo de desplazamiento para los modelos generados en este capítulo, así como la dirección de la carga lateral aplicada. Los puntos 1-B y 2-A miden el desplazamiento vertical de la losa, mientras que los puntos 1XM y 2XM miden el desplazamiento lateral del muro.

El punto 2XM es importante para establecer la distorsión lateral real del muro en vista de que sufre rotaciones durante la aplicación de la carga lateral; dichas rotaciones se traducen en desplazamientos, tanto en el eje vertical como el horizontal, en donde estos últimos tienen relación con la distorsión lateral real del muro.

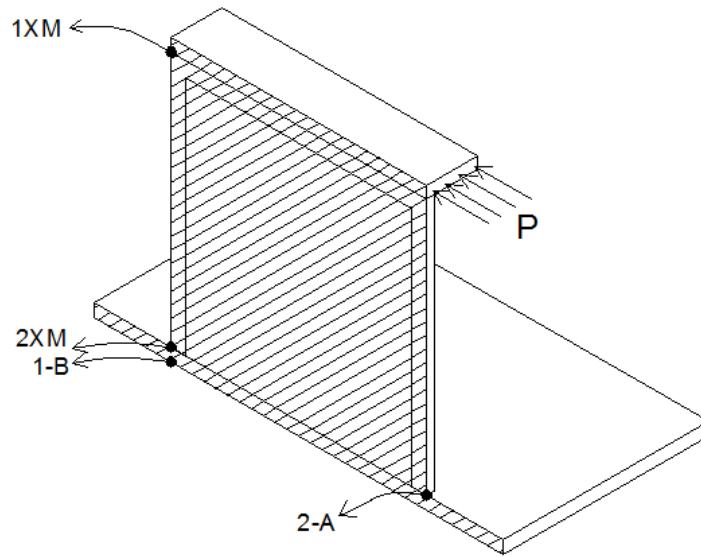


Figura 6.2 Puntos de monitoreo de desplazamiento

6.4 MODELOS DE LOSAS CUADRADAS CON MUROS (ANÁLISIS POR DESPLAZAMIENTOS, CARGAS COMBINADAS)

En esta sección se muestran las curvas de capacidad de los sistemas estructurales analizados previamente bajo carga vertical última, pero ahora sujetos a una carga vertical de servicio más una carga lateral última. Al igual que en el capítulo anterior se presentan los modelos en pares de acuerdo a su geometría, teniendo como diferencia entre ellos el tipo de material asignado al muro de carga. Se sigue la nomenclatura de la *tabla 4.1* del *Capítulo 4*.

6.4.1 MODELOS M9_C2.5_12VL y M10_M2.5_12VL

La gráfica de la *figura 6.3* muestra las curvas resultantes de aplicar una carga vertical en forma de presión al muro y, posteriormente, una carga lateral también en forma de presión. Dicha gráfica es el historial de desplazamiento lateral del punto 1XM de acuerdo a la *figura 6.2*, producido de la fuerza P. Sin embargo, se debe mencionar que la gráfica muestra la distorsión y neta, en vista de que también el punto 2XM se desplaza horizontalmente en sentido contrario al punto 1XM. Por ello, estos desplazamientos se deben sumar para obtener valores netos.

En la *figura 6.3* se presenta la comparación de los dos modelos en donde se puede determinar la magnitud de la carga lateral y su respectiva distorsión lateral.

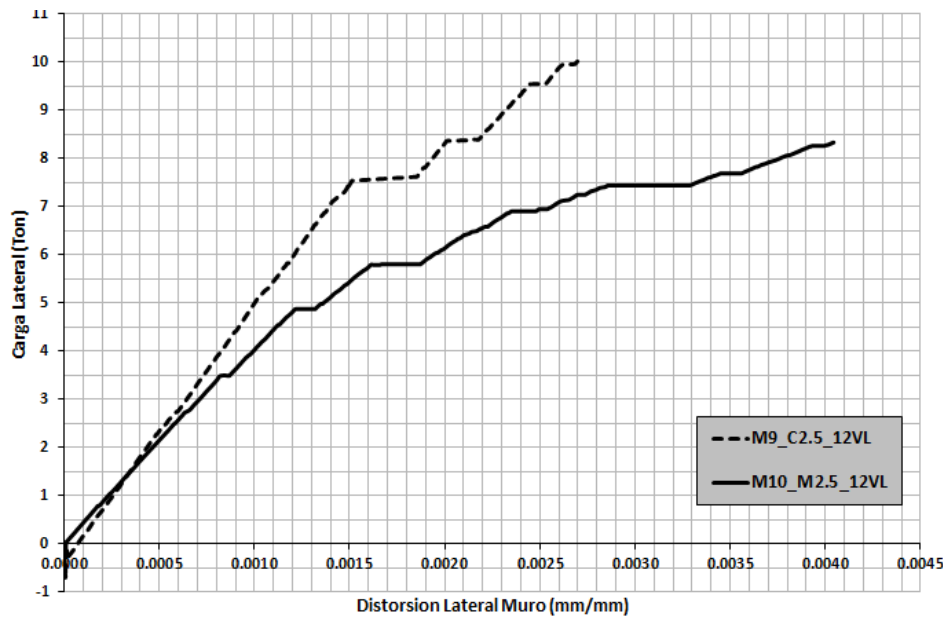


Figura 6.3 Carga lateral Vs. distorsión lateral

También; son de interés los desplazamientos verticales de la losa, para tal propósito en la *figura 6.4* se muestra el historial de desplazamiento vertical de los puntos de 1-B y 2-A (*ver figura 6.2*) de ambos modelos analizados en esta sección. En primer lugar se observa que el desplazamiento de los modelos no inicia en cero, esto se debe a que previamente se ha aplicado al modelo una carga vertical. Aquí, solo se grafica la historia relacionada con la carga lateral.

También se aprecia que las curvas relacionadas con el punto 2-A sufren un cambio en la dirección del desplazamiento debido a que dicho punto se encuentra del lado donde se aplica la carga. Inicialmente, debido a la carga vertical, sufre un desplazamiento positivo (hacia abajo) y posteriormente, una vez que se aplica la carga lateral, la zona donde se encuentra este punto tiende a levantarse, mostrando un desplazamiento negativo (hacia arriba).

Se observa, que la losa se deforma más con los muros de concreto, en vista de la rigidez de éstos, la losa absorbe prácticamente toda la energía de deformación del sistema. La rigidez del sistema con muro de concreto se hace notoria en las *figuras 6.3* y *6.4*, en donde la curva muestra un comportamiento lineal bien definido hasta una carga lateral de 7.5 toneladas aproximadamente esto contrario a lo que sucede con el modelo con muro de mampostería, en donde el muro y no la losa comienza a perder rigidez a una carga lateral de 3.5 toneladas.

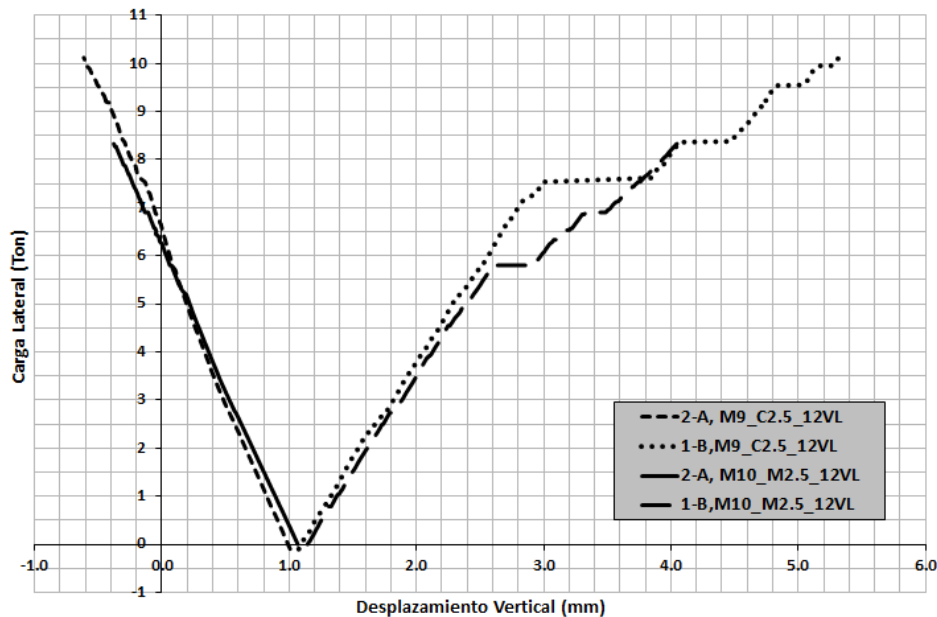


Figura 6.4 Carga lateral Vs. Desplazamiento vertical; modelos M9_C2.5_12VL y M10_M2.5_12VL

Para realizar el estudio del comportamiento lateral del muro, se decidió comparar distorsiones y no desplazamientos netos, en vista de que las primeras dan una mejor idea del estado del muro al final del proceso de carga. En la *figura 6.3* se pueden observar tres diferencias preponderantes entre ambos modelos: carga lateral última, distorsión lateral última y rigidez inicial. Con respecto a la capacidad de carga lateral última y a la rigidez inicial del sistema, el modelo M9_C2.5_12VL es notablemente superior al modelo M10_M2.5_12VL. En cuanto a capacidad de deformación lateral, el modelo con muro de concreto desarrolla menores distorsiones; no por el hecho de que el muro haya fallado, sino porque la losa que lo sustenta ya se encuentra muy dañada, lo que limita la capacidad de deformación lateral del sistema en general.

Como un comentario acerca de las gráficas de deformación lateral, se puede señalar que en algunos casos se aprecian pequeñas irregularidades cerca del origen de las, esto se debe a que en dichas curvas se incluye también la historia del desplazamiento vertical provocado por la carga vertical inicial.

6.4.2 MODELOS M11_C3_12VL y M12_M3_12VL

A continuación se presentan las gráficas correspondientes a los modelos con muro de tres metros de longitud y losa de doce centímetros de espesor. Contrario a los resultados del capítulo anterior, en donde los modelos analizados con muro de concreto o de mampostería

observaban un comportamiento similar, cuando se introduce una carga lateral el desempeño de ambos sistemas tiende a diferir en mayor medida, como se observa en las figuras 6.5 y 6.6.

Se puede notar una tendencia en los modelos analizados bajo carga lateral. Cuando se tiene un muro de concreto su comportamiento puede aproximarse a un modelo elastoplástico con una carga de fluencia bastante marcada. Mientras que en el caso de muros de mampostería, la forma puede aproximarse a una parábola irregular, con algunos quiebres antes de alcanzar la carga última, donde el tamaño de la meseta de fluencia del sistema se incrementa.

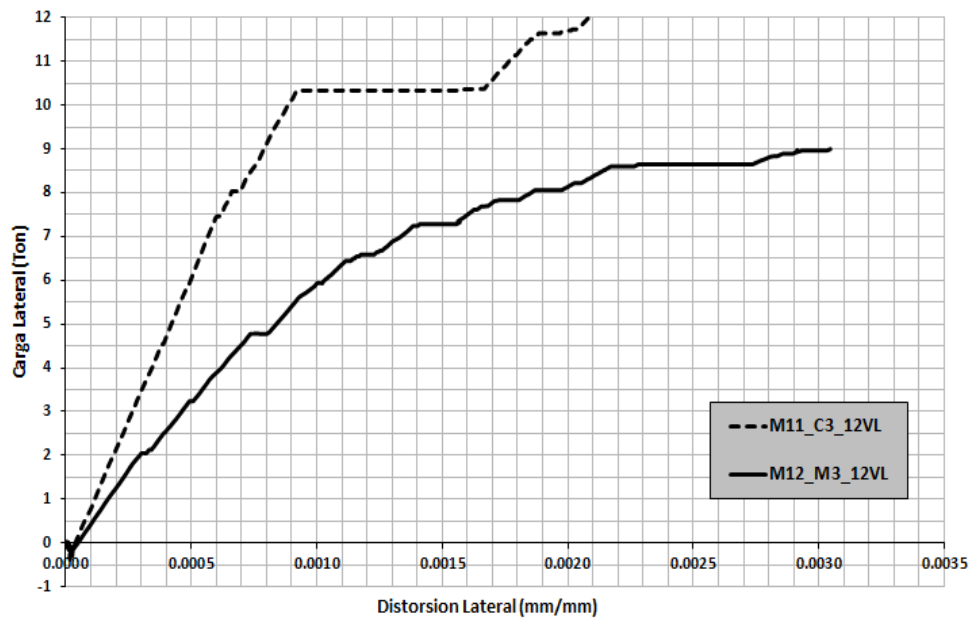


Figura 6.5 Carga lateral Vs. distorsión lateral; M11_C3_12VL; M12_M3_12VL

Es interesante señalar que en los modelos con muro de concreto el sistema está regido por la capacidad de la losa, mientras que en los modelos con muro de mampostería la capacidad de la estructura depende más del muro.

Lo anterior se muestra en las figuras 6.5 y 6.6, donde se nota que para los modelos con muro de concreto existe gran similitud entre la curva de desplazamiento lateral del muro y la del desplazamiento vertical, específicamente en el punto de monitoreo 1-B. De hecho, la meseta de fluencia se presenta para la misma carga lateral (Aprox. 10.5 ton.), lo que indica que falla primero la losa.

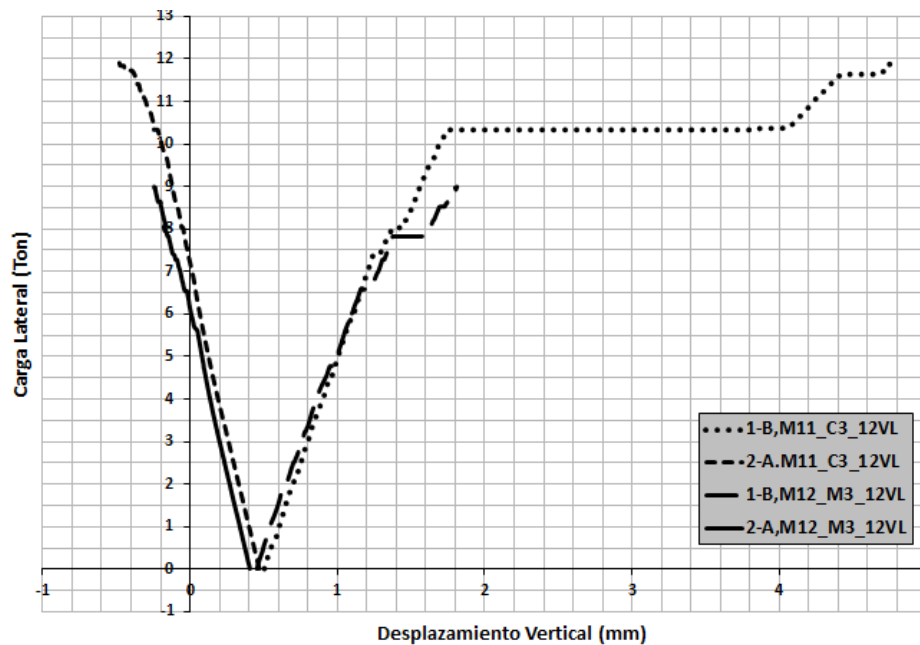


Figura 6.6 Carga lateral Vs. Desplazamiento vertical; modelos M11_C3_12VL y M12_M3_12VL

En los modelos con muros de mampostería el comportamiento es diferente. La forma de la gráfica de distorsión lateral difiere en gran medida de la que presenta el desplazamiento vertical en el punto 1-B.

En estos casos se puede observar en dichas figuras que cuando la gráfica de desplazamiento vertical en el punto 1-B (*figura 6.6*) alcanza la primera fluencia (aprox. 8 ton.) el muro (*figura 6.5*) ya ha presentado varios puntos de fluencia a cargas laterales menores. Por esta razón se considera que la capacidad del sistema está regida por el muro de mampostería, contrario a lo que ocurre con los modelos con muros de concreto, en los que la capacidad de la losa es la que determina la carga última del sistema.

Además, en la gráfica mostrada en la *figura 6.5* se nota la superioridad del comportamiento del sistema con muro de concreto sobre el de mampostería ante carga lateral, alcanzando el primero al menos 25% más capacidad de carga lateral sobre el último.

Sin embargo, debe señalarse el hecho de que el sistema de muro de mampostería tiene una mayor capacidad de deformación lateral. Además, muestra un comportamiento más estable que el del concreto, en el sentido de que este último aunque posee mayor capacidad, puede presentar algún tipo de falla frágil si es sometido a grandes distorsiones laterales.

6.4.3 MODELOS M13_C3.75_12VL y M14_M3.75_12VL

Estos modelos son muy particulares, en vista de que el comportamiento del sistema en general es regido por la capacidad que posea el muro tanto lateral como verticalmente, tomando la losa un papel secundario.

Como se vio en el capítulo anterior es necesaria una carga vertical muy elevada para que el muro, ya sea de concreto o mampostería, muestre algún daño de importancia. La *figura 6.7* muestra la gráfica de comportamiento ante carga lateral del sistema con muro de concreto. Se ve que este puede soportar una carga lateral de importancia, de hecho es probable que dicha carga pueda ser mucho mayor a la mostrada en la figura mencionada.

No pasa lo mismo cuando el muro es de mampostería, en donde la capacidad lateral del sistema es exclusiva del muro. En la figura 6.7 se aprecia que la capacidad a carga lateral del sistema es aproximadamente 11 Toneladas, presentándose a esta carga una marcada meseta de fluencia.

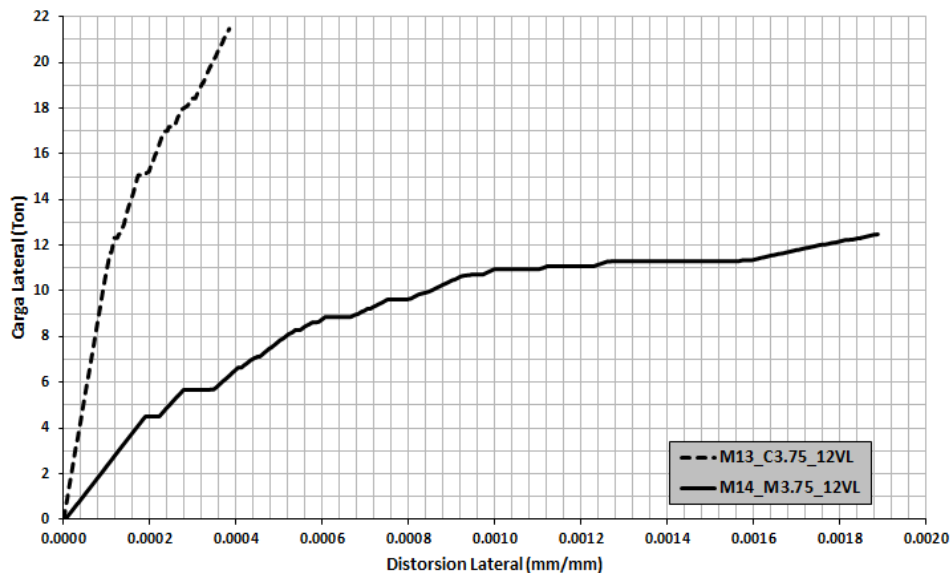


Figura 6.7 Carga lateral Vs. distorsión lateral; M13_C.3.75_12VL; M14_M3.75_12VL

Se debe considerar al sistema en forma global, es decir, la losa y el muro interactuando, dado que en el comportamiento lateral y vertical ambos tienen mayor o menor participación. Por tanto, considerarlos por separados sería erróneo.

Una comparación interesante del comportamiento de ambos sistemas se muestra en la *figura 6.7*, en donde la diferencia es bastante marcada, siendo el modelo con muro de concreto muy

superior en capacidad de carga lateral pero está limitado respecto al modelo con muro de mampostería en lo que se refiere a capacidad de deformación lateral.

La rigidez inicial del modelo M13_C3.75_12VL es evidente. Sin embargo, como ya se ha señalado en los modelos con muro de concreto, estos tienen el inconveniente que se pueden generar fallas frágiles por cortante en el sistema.

6.4.4 MODELOS M15_C3_13VL y M16_M3_13VL

Estos modelos tienen poseen una losa de trece centímetros de espesor, por lo demás son idénticos a los modelos M11_C3_12VL y M12_M3_12VL.

Lo interesante en este caso es apreciar el impacto que tiene el aumento de rigidez de la losa al aumentar el espesor de la misma en tan solo un centímetro. Se debe señalar que sí existe un efecto notable, especialmente cuando se tienen muros de mampostería; lo que se explicará en detalle más adelante en esta sección.

Estos modelos siguen la tendencia observada en los anteriores; es decir, el modelo con muro de concreto posee una mayor capacidad de carga lateral pero es limitado en deformaciones laterales, como se observa en las figuras 6.8.

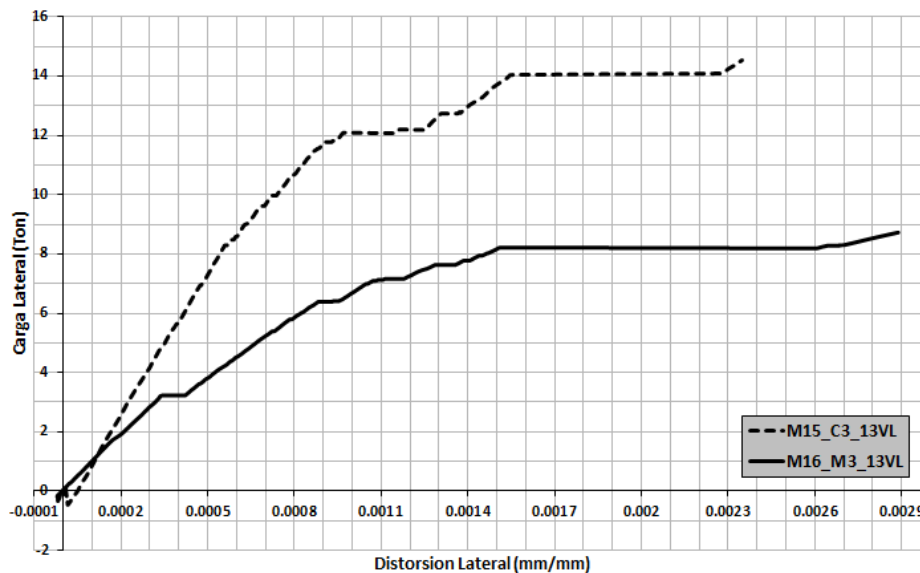


Figura 6.8 Carga lateral Vs. distorsión lateral; M15_C3_13VL; M16_M3_VL

Quizá las gráficas que muestren con mayor claridad el efecto del aumento en la rigidez de la losa sean las figura 6.11 y 6.12. Si comparamos la curva del modelo M15_C3_13VL, en la figura 8 con la del punto 1-B del mismo modelo en la figura 9, Se aprecia una gran similitud. Además, la

primera fluencia en ambas curvas se presenta a una misma carga (aprox. 12 ton.), de esta forma se puede afirmar que es la losa la que determina la capacidad del sistema.

En la figura 6.8, para el modelo M16_M3_13VL, se observa que ante desplazamiento lateral se generan en el sistema dos pequeñas mesetas de fluencia, la primera cerca de 3 Ton y la segunda a 6 Ton. Sin embargo, si se observa la curva del punto 1-B de dicho modelo, en la figura 6.9, se ve que la losa muestra una pequeña fluencia a 5 Ton de carga vertical y otra a un poco menos de 8 Ton manteniendo en general un comportamiento elástico lineal.

Un poco después de las 8 Ton de carga vertical el sistema fluye lateralmente, en forma clara. Es decir el muro falla o se daña en mayor medida, mientras que la losa aún posee capacidad de desplazamiento vertical.

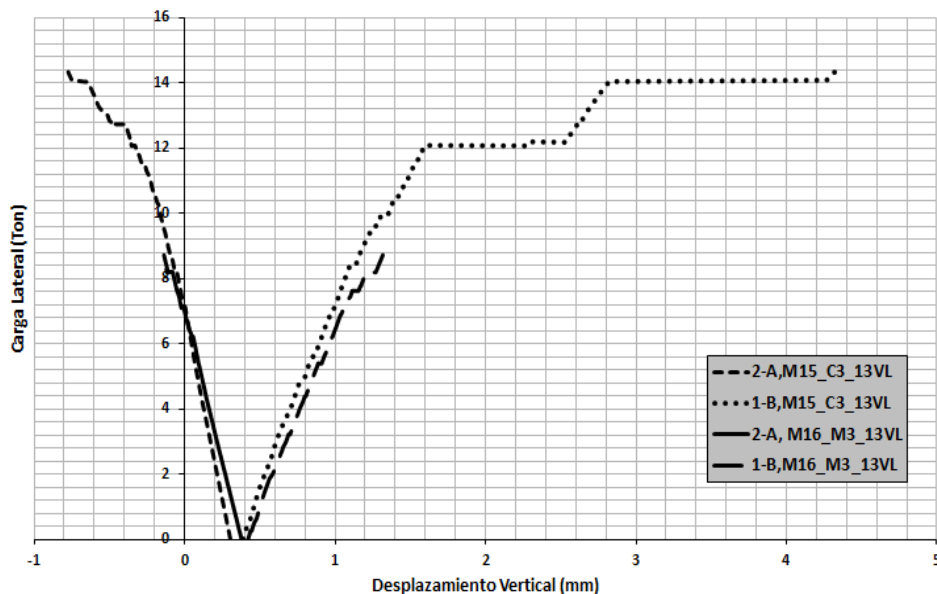


Figura 6.9 Carga lateral Vs. Desplazamiento vertical modelos M15_C3_13VL y M16_M3_13VL

De acuerdo a las figuras 6.8 y 6.9, se puede establecer que la rigidez del muro de mampostería no es suficiente para dañar significativamente la losa cuando el muro ejerce sobre esta, podría decirse, una carga concentrada en la esquina. En tal condición, primero se daña el muro de mampostería.

Mientras que cuando se tienen muros de concreto la situación cambia, la losa se ve afectada por la componente de fuerza vertical ejercida por el muro a causa de la carga lateral. El muro de concreto prácticamente no sufre daño en esa zona.

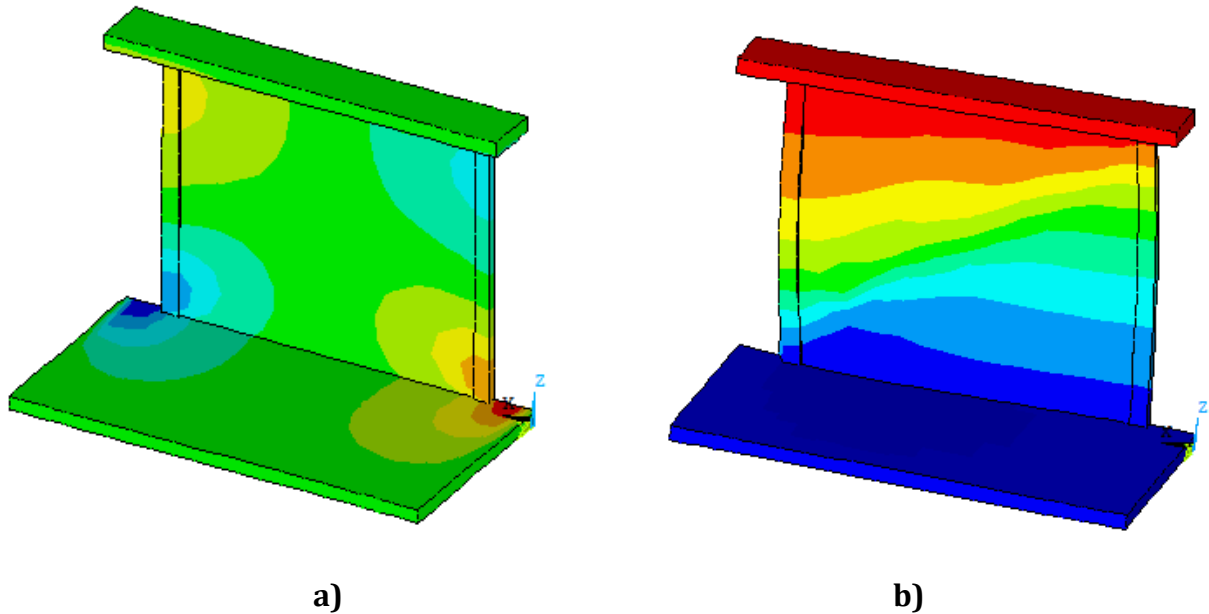


Figura 6.10 Estados de Desplazamiento Lateral a) Al final de la aplicación de la carga vertical b) Al final de la aplicación de la carga lateral

A manera de ilustración se presentan en la *figura 6.10* los estados de desplazamiento lateral luego de aplicar las cargas a los modelos, en la *figura 6.10.a*, se muestra el contorno de desplazamientos laterales al final de la aplicación de la carga vertical de servicio, en vista de la simetría geométrica y de cargas dichos contornos deben ser simétricos y representan valores de desplazamientos muy pequeños. Partiendo del estado de deformaciones anterior se aplica la carga lateral, obteniéndose al final de la aplicación de esta el contorno de desplazamiento lateral que muestra la *figura 6.10.b*, donde el color rojo representa esquemáticamente los valores de desplazamiento mayores y el azul oscuro los menores.

6.5 COMPARACIÓN DE LAS CURVAS DE CAPACIDAD DE LOS MODELOS NO LINEALES ANALIZADOS BAJO CARGA COMBINADA

Al igual que en el capítulo anterior, se realiza una comparación de todas las curvas generadas de los modelos realizados pero ahora sometidos a carga combinada. Primero, se comparan de acuerdo al tipo de material que conforma el muro de carga, y luego se hace una comparación general.

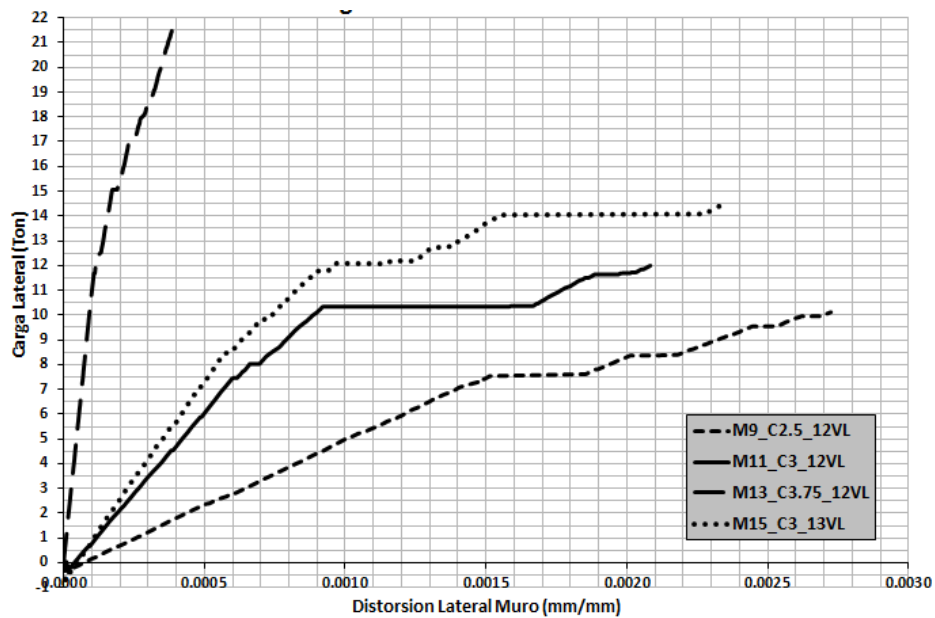


Figura 6.11 Comparación de distorsión lateral de los modelos con muro de concreto

En la *figura 6.11*, es interesante ver que la primera fluencia se da a distorsiones mayores con respecto a los modelos con muro de mampostería (*figura 6.12*). Además, se puede observar la diferencia en capacidad de carga y deformación entre los dos modelos con muros de tres metros de longitud, en donde el que tiene una losa con espesor de 13 cm muestra un mejor comportamiento que el de 12 cm de espesor. El modelo M13_C3.75_12V resulta ser bastante rígido en comparación con los demás teniendo una gran capacidad ante carga lateral.

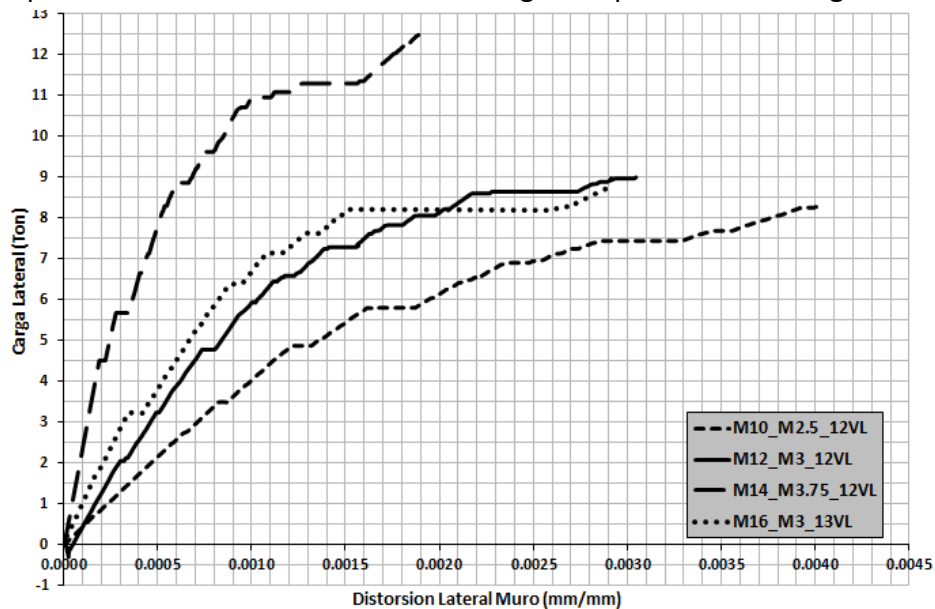


Figura 6.12 Comparación de distorsión lateral de los modelos con muro de mampostería

En la *figura 6.12* se grafican las curvas de capacidad de los modelos con muro de mampostería, en estos casos se observa que a medida que la longitud del muro aumenta también crece su capacidad ante carga lateral, esto es lógico ya que aumenta su área resistente al cortante, pero también disminuye su capacidad de deformación.

Finalmente, la *figura 6.14* muestra las curvas de capacidad de todos los modelos analizados. Existe una marcada diferencia entre los modelos de concreto y mampostería, siendo los primeros muy superiores en capacidad de carga y rigidez, mientras que los segundos tienen la virtud de tener una mayor capacidad de deformación.

Sin embargo, es necesario aclarar que en los ocho modelos generados la distorsión última mostrada en cada caso en las figuras podría llegar a ser mayor, ya que en estas distorsiones últimas se ven limitadas al estado final de los elementos finitos generados en el programa numérico (ANSYS). Es decir, que si en uno o más elementos finitos, producen zonas de agrietamiento o aplastamiento el programa deja de converger o ya no es posible obtener una solución más allá del estado final de carga, sin embargo como se muestra en la *figura 6.13*, a excepción del modelo M13_C3.75_12VL, cuyo daño es escaso, los demás modelos antes de alcanzar su estado último ya han experimentado pérdidas de rigidez significativas lo que se traduce en agrietamientos en el sistema.

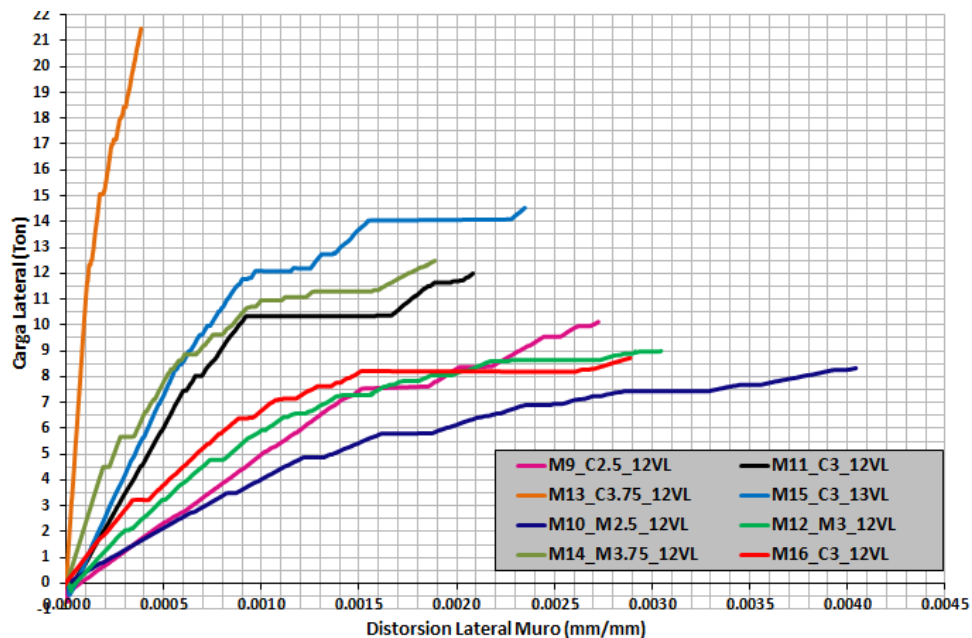


Figura 6.13 Comparación de distorsión lateral todos los modelos sometidos a carga combinada

El problema de la no convergencia o singularización de la matriz de rigideces de los elementos finitos, lógicamente no se presentan en un proyecto experimental en donde el espécimen de

prueba puede sufrir grietas de diferentes anchos u otro tipo de no linealidades, pero se tiene la ventaja de poder determinar su carga de colapso, es por tal motivo que los estudios experimentales generalmente arrojan, mayores distorsiones laterales, específicamente en el caso de especímenes de muro.

La *tabla 6.1* muestra una comparación numérica de los resultados más relevantes en el comportamiento de las estructuras analizadas; siendo estos, la condición donde el comportamiento del sistema deja de ser lineal, también la carga a la cual se experimenta la primera fluencia significativa del sistema y la carga y distorsión ultima que se produce en el modelo.

Tabla 6.1 Tabla resumen de los modelos bajo carga combinada

Modelo	Limite Rango Elástico		Primera Fluencia		Estado Ultimo	
	Carga Lateral (Ton)	Distorsión (mm)	Carga Lateral (Ton)	Distorsión (mm)	Carga Lateral (Ton)	Distorsión (mm)
M9_C2.5_12VL	7.5	0.0015	7.5	0.0015	9.5	0.0024
M10_M2.5_12VL	3.5	0.0008	4.9	0.0012	7.7	0.0037
M11_C3_12VL	7.5	0.0006	10.5	0.0009	11.5	0.0020
M12_M3_12VL	2.0	0.0003	7.4	0.0014	8.5	0.0027
M13_C3.75_12VL	15	0.0002	--	--	--	--
M14_M3.75_12VL	4.5	0.0001	11.4	0.0010	11.4	0.0015
M15_C3_13VL	8.5	0.0006	12.2	0.0009	14.0	0.0024
M16_M3_13VL	3.3	0.0003	8.4	0.0015	8.4	0.0027

6.6 MUROS SOBRE BASE RÍGIDA

Es necesario llevar el estudio más allá de la losa y adentrarse un poco en lo que es el comportamiento del muro, especialmente si hablamos de solicitaciones laterales, en vista que se han observado excesivos agrietamientos en los muros de los de los primeros niveles de edificios construidos bajo esta modalidad de losas de transferencia.

Se analizaron modelos de los mismos muros que los sistemas de losa de transferencia, pero con la diferencia de que estos no están sobre la losa sino sobre una base rígida e indeformable.

El objetivo es comparar la influencia de estar o no apoyados sobre una losa de transferencia, específicamente ante carga lateral. Se le aplicó al modelo del muro sobre base rígida la misma carga vertical de los modelos de la *sección 6.4* y seguido de una carga lateral hasta lograr la falla del mismo, obteniendo de esta forma una curva de capacidad para cada uno; de modo, que se pueda hacer una comparación valida en cada caso.

En la *figura 6.14* se muestra esquemáticamente la geometría y las cargas aplicadas a los modelos de muro sobre base rígida, en los cuales, se han restringido todos los grados de libertad en la parte inferior del muro dejando dicha base totalmente indeformable como suelen modelarse convencionalmente. Al igual que los modelos con losas de transferencia la carga lateral aplicada es incremental y en un solo sentido como se observa en la *figura 6.14*.

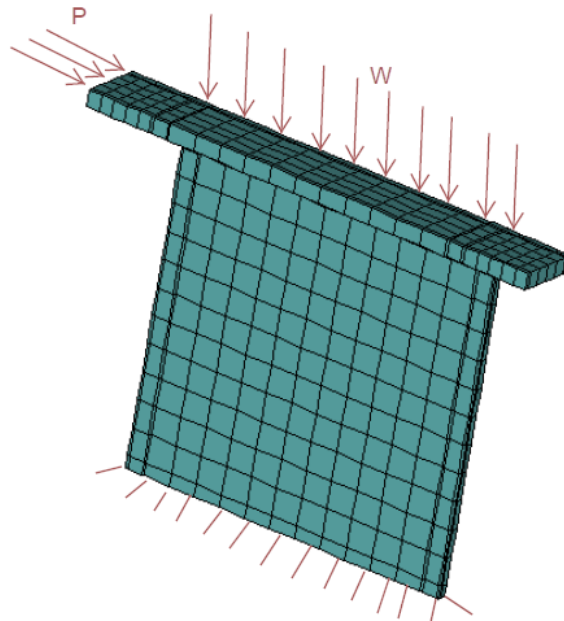


Figura 6.14 Esquema de geometría y carga de los modelos de muro sobre base rígida

Sobre al análisis de muros de mampostería o concreto sobre base rígida sometidos a carga lateral se han realizado numerosos trabajos, analíticos y experimentales. Por tanto, no es objeto de esta sección centrarse en el estudio de muros sino más bien utilizar los resultados de estos para poder ser comparados con los resultados que se han obtenido para los modelos de losa de transferencia.

De acuerdo a la nomenclatura utilizada para los modelos de muros sobre base rígida que se definió en la *tabla 4.2* del *capítulo 4* se han llevado a cabo los análisis de dichos modelos.

Existen varias consideraciones que se deben tomar en cuenta al momento de realizar la interpretación de las curvas que se muestran en las figuras 6.15 a la 6.17. En primer lugar, al referirse a los muros de mampostería se debe tener claro que tanto los modelos realizados para losa de transferencia como los que tienen base rígida, no se están modelando las juntas de mortero de la mampostería, en lugar de eso, se ha considerado un material homogéneo, asignándole las propiedades de la mampostería en conjunto.

De acuerdo a lo anterior no se toman en cuenta los planos de falla que se generan en las juntas de mortero tanto vertical como horizontalmente. Es probable que en modelos experimentales los muros de mampostería confinada puedan alcanzar mayores distorsiones.

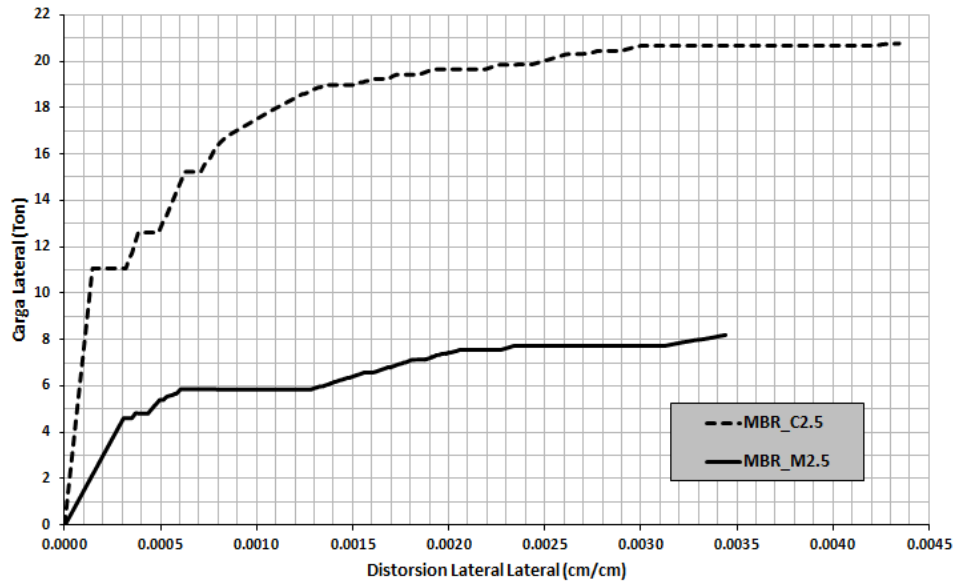


Figura 6.15 Carga lateral Vs. distorsión lateral; MBR_C2.5; MBR_M2.5

La resistencia y la ductilidad última de los sistemas analizados están sujetos a la convergencia que se pueda tener dentro del programa utilizado. Si un conjunto de elementos en determinada área del modelo han excedido sus esfuerzos últimos provocando agrietamientos en dos o tres de sus planos principales, estos dejan de transmitir rigidez a los elementos contiguos generando de esta forma matrices de rigidez singulares deteniendo de esta forma el análisis.

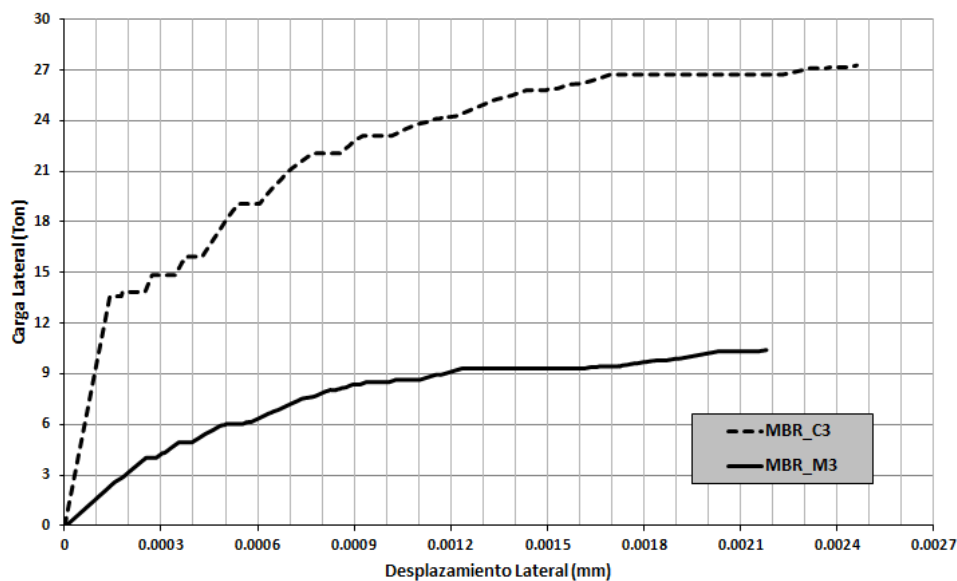


Figura 6.16 Carga lateral Vs. distorsión lateral; MBR_C3; MBR_M3

Sin embargo los resultados son bastante buenos en comparación con los obtenidos en pruebas experimentales y analíticas realizadas a muros sujetos a cargas laterales y apoyadas sobre base rígida, a pesar de que en los modelos aquí analizados, no se alcanza llegar a distorsiones de más de 0.0040, específicamente en los de mampostería.

También, es necesario mencionar que en todos los modelos generados los muros no se encuentran reforzados horizontalmente, esto podría tener un efecto en menor o mayor medida en la resistencia a corte de la estructura como en su capacidad de deformación.

Sin embargo se dispuso realizar los modelos con la ausencia de refuerzo horizontal en vista de que se encontró que en varios edificios construidos en la ciudad de México no se utilizó refuerzo horizontal alguno en los muros de mampostería.

Respecto a los muros de concreto analizados estos están confinados con castillos y dalas concreto reforzado. La zona del muro confinada dentro de los castillos y la dala no posee refuerzo alguno, por lo tanto los resultados de los modelos de muro de concreto ante carga lateral tienen una finalidad meramente comparativa en vista de que estos generalmente se refuerzan con acero en toda su longitud y no solo en sus extremos. De acuerdo a lo mencionado, esta fuera del alcance de esta tesis determinar el impacto del refuerzo horizontal y vertical del muro de concreto en su desempeño ante carga lateral.

Se observa en las gráficas de esta sección que los muros de mampostería pierden su comportamiento elástico a distorsiones relativamente bajas, del orden de menos de 0.0010, mientras que los muros de concreto a muestran una muy definida ruta elástica hasta comenzar a agrietarse a una carga mayor con respecto a los muros de mampostería. Ambas estructuras muestran comportamientos diferentes ante carga lateral.

La figuras 6.15 a 6.17, presentan las curvas de capacidad de los modelos de muro sobre base rígida en donde se grafica la carga lateral contra su distorsión lateral, tomando en cuenta que todos los muros de los modelos analizados poseen una altura de 2.50 metros libres.

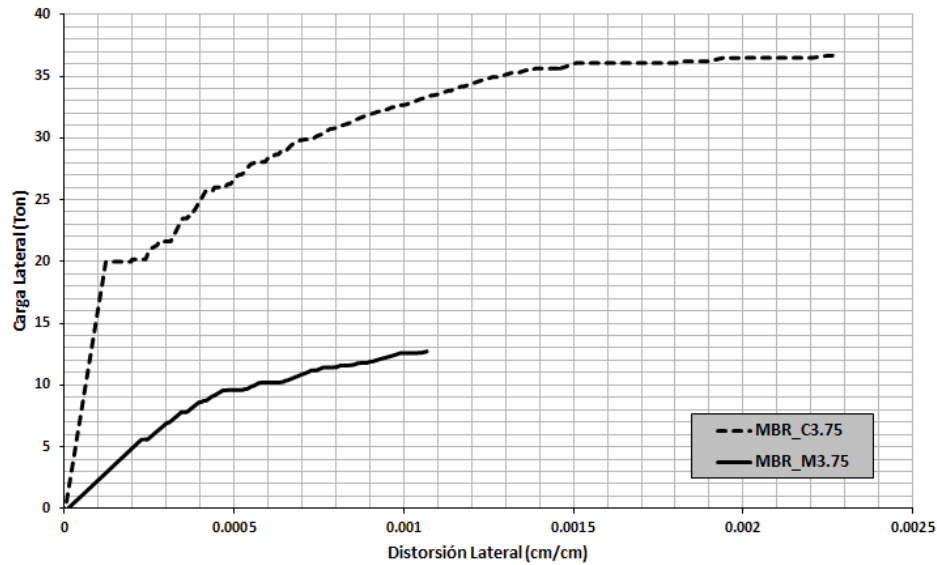


Figura 6.17 Carga lateral Vs. distorsión lateral; MBR_C3.75; MBR_M3.75

6.6.1 RESULTADOS ESPERADOS DE RESISTENCIA A CORTANTE DE LOS MUROS DE MAMPOSTERÍA SOBRE BASE RÍGIDA

Según las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería del Distrito Federal, la fuerza cortante de diseño resistida por la mampostería confinada viene dada por la siguiente expresión:

$$V_{mR} = F_R(0.5v_m^*A_T + 0.3P) \leq 1.5F_Rv_m^*A_T \quad (6.1)$$

Donde:

F_R = Factor de Resistencia, en este caso se tomara como 1

v_m^* = Resistencia a la Compresion diagonal de la mamposteria

A_T = Area transversal del muro incluyendo los castillos

P = Carga vertical sobre el muro, positiva en compresion

Para fines de cálculo se considerara la resistencia a compresión diagonal como 3 kg/cm², además de ello se utilizaran el área transversal y la carga vertical utilizadas en la elaboración de los modelos. A continuación se tabulan los resultados para los tres modelos de mampostería.

Tabla 6.2 Predicción de la resistencia de los modelos con muro de mampostería sobre base rígida

Modelo	$v \cdot m$ (kg/cm ²)	At (cm ²)	P (kg)	VmR (Ton)	Modelo E.F. (Ton)
MBR_M2.5	3.00	3125	6000	6.49	5.90
MBR_M3	3.00	4500	7000	8.85	6.00
MBR_M3.75	3.00	4687	15000	11.53	9.80

Realizando las comparaciones de los valores calculados para la resistencia a fuerza cortante según la tabla 6.2 y los mostrados en las gráficas de la sección 6.7.2 se observa una gran similitud entre ambos resultados, considerándose de esta forma que las curvas dan una excelente aproximación de la resistencia ultima del muro.

6.7 COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ANTE CARGA LATERAL DEL SISTEMA MURO-LOSA Y DE MUROS SOBRE BASE RÍGIDA

Esta sección se determina las diferencias existentes en el desempeño ante carga lateral de un sistema de losa de transferencia y uno con un muro apoyado sobre base rígida.

Es importante establecer que en esta sección, en el caso de los sistemas losa-muro, no se analiza el muro por sí solo, por el contrario al realizar la comparación entre los modelos de losas de transferencia con los de muros sobre base rígida, lo que se comparan son dos sistemas estructurales como un todo y no la losa y el muro por separado, dado de que como ya se ha mencionado, en los pisos de transferencia el muro no es independiente de la losa y viceversa, el comportamiento de uno afecta al otro.

También además de las gráficas se presentan los estados finales de agrietamiento de los muros de ambos tipos de sistemas que se están estudiando, esto con el fin de apoyar los comentarios que se hacen respecto a cada una de las gráficas comparativas.

6.7.1 SISTEMA CON MURO DE CONCRETO

En las gráficas comparativas que se presentan en las figuras 6.18, 6.19 y 6.20 se puede apreciar una gran diferencia entre el muro apoyado sobre base rígida y su similar apoyado directamente sobre la losa de transferencia. Se observa que ambos sistemas difieren en cuatro aspectos importantes que se enumeran a continuación:

1. Rigidez inicial del sistema
2. Capacidad total de carga

3. Capacidad de deformación
4. Forma de la curva de capacidad

Al mismo tiempo que se presentan las curvas de capacidad de ambos sistemas también se muestran su estado de agrietamiento al final de la aplicación de la carga lateral. Primero, si se refiere a la rigidez inicial que poseen ambos sistemas, la diferencia es notable; este es uno de los efectos de que un muro este sobre una base deformable y el otro sobre una base rígida.

Con respecto a la capacidad de carga lateral prácticamente en todos los modelos con muro de concreto el sistema sobre base rígida supera en más del 100% al sistema con losa de transferencia.

En lo que se refiere a la capacidad de deformación los sistemas sobre base rígida son notablemente superiores pudiendo lograr distorsiones mucho mayores a las que alcanzan los sistemas de losa de transferencia.

Entonces se forman varias interrogantes ¿por qué tanta diferencia en el comportamiento de ambos sistemas?, ¿Por qué un sistema es más resistente y soporta mayores deformaciones? ¿Cuál es la razón de que un sistema se vea mucho más agrietado que el otro?; a parte de las gráficas, los esquemas de agrietamiento mostrados de cada muro indican cuál es la razón.

Como se puede ver en los gráficos de agrietamiento la diferencia en daño de uno y otro muro es bastante significativo, es decir que el muro apoyado sobre la losa prácticamente no sufre agrietamiento mientras que en los muros sobre base rígida el agrietamiento es evidente especialmente en la zona sometida a tensión, en la esquina inferior izquierda del mismo.

De acuerdo a lo mencionado, el muro de concreto sobre base rígida desarrolla la mayor parte de su capacidad a cortante, mientras que en los sistemas de losa de transferencia el muro escasamente aporta resistencia cortante debido principalmente a que las rotaciones producto de la carga vertical que se da en la losa le resta un gran porcentaje de rigidez al sistema como se observa en las figuras 6.18 a 6.20.

Este aspecto es muy dañino para la losa, especialmente para las zonas que se encuentran cerca de los extremos del muro, debido a que es en esos puntos en donde la losa experimenta grandes agrietamientos en su superficie inferior así como aplastamiento del concreto en el área superior, debilitando en gran medida la capacidad de la losa.

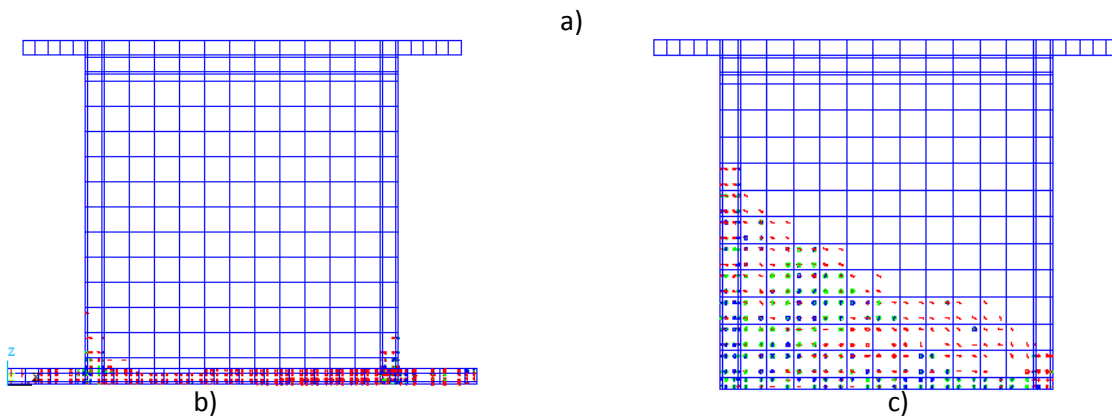
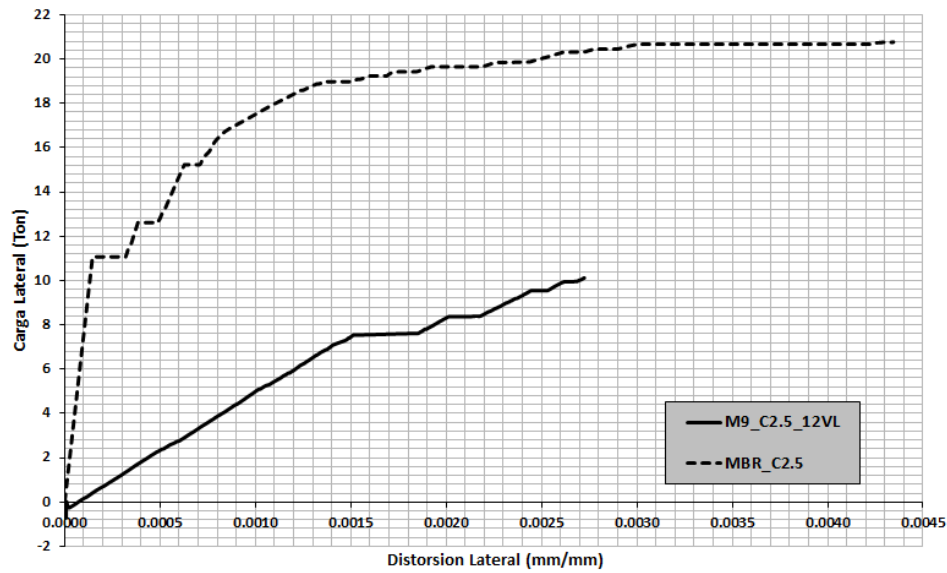
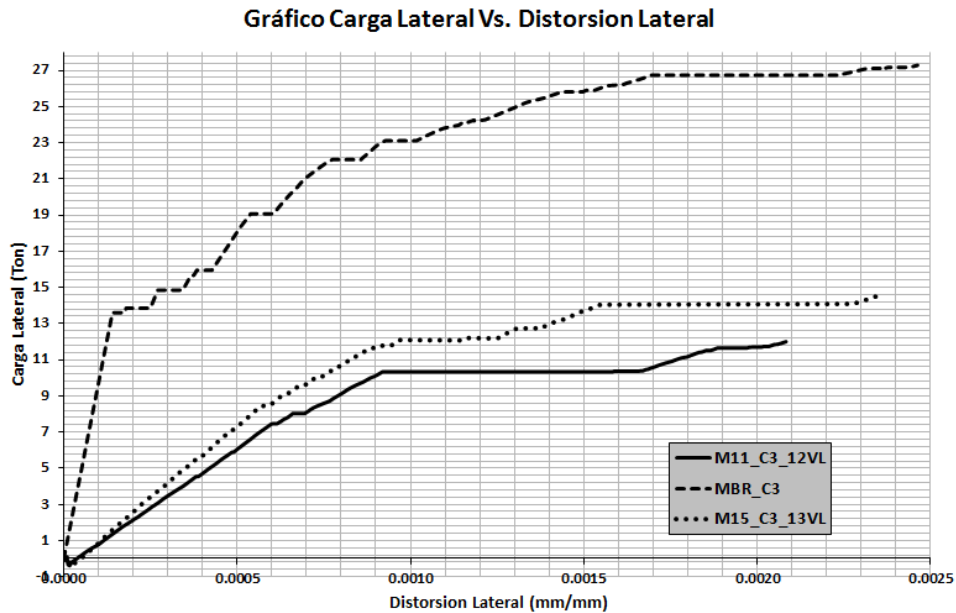
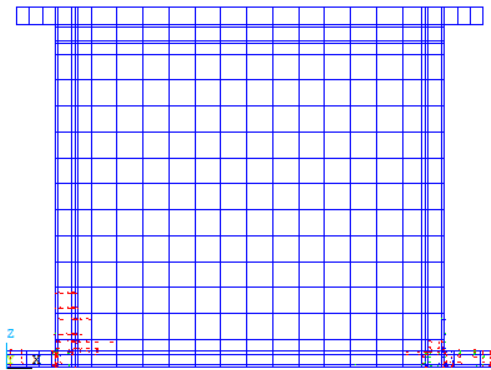


Figura 6.18 a) Carga lateral Vs. distorsión lateral M9_C2.5_12VL y MBR_C2.5, b) Agrietamiento M9_C2.5_12VL, c) Agrietamiento MBR_C2.5

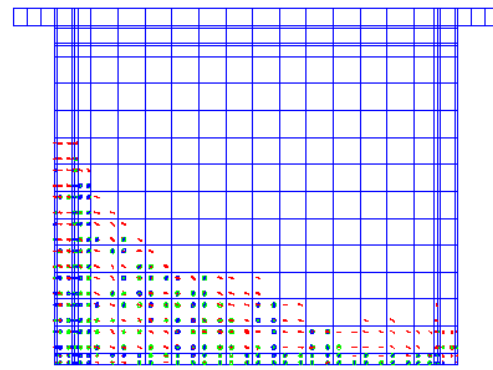
Entonces se sabe que el muro por si solo posee una gran capacidad ante carga lateral, pero en cuando está apoyado sobre la losa no la puede desarrollar en su totalidad. En realidad lo que pasa es que en el caso de la losa de transferencia con muros de concreto, lo que finalmente decide la capacidad del sistema, es la resistencia a cortante de la losa al ser punzonada por el puntal de compresión que genera el muro sobre la misma debido a la carga lateral aplicada, de esta forma en la esquina inferior opuesta a la aplicación de la carga lateral se presentan en la superficie superior de la losa aplastamiento del concreto y en la superficie inferior tenemos agrietamiento excesivo, como se muestra en la *figura 6.21*.



a)



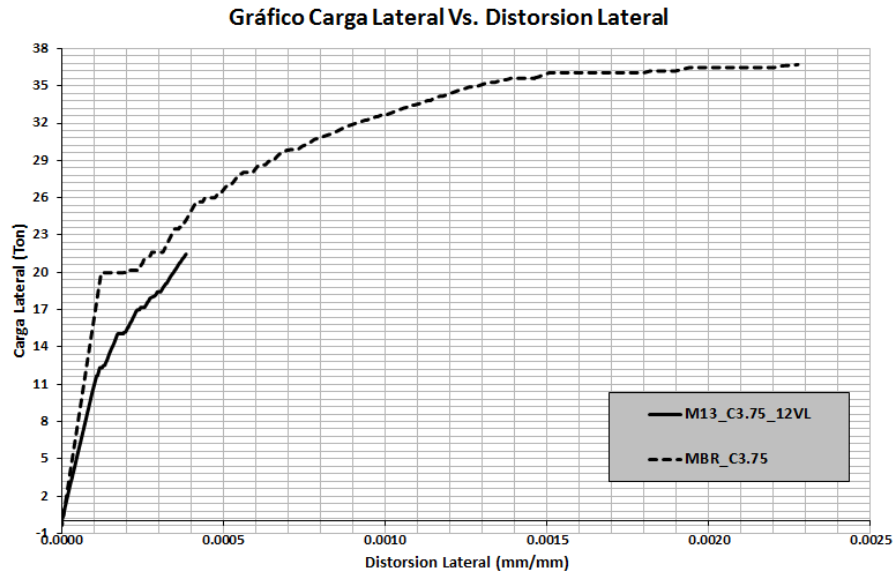
b)



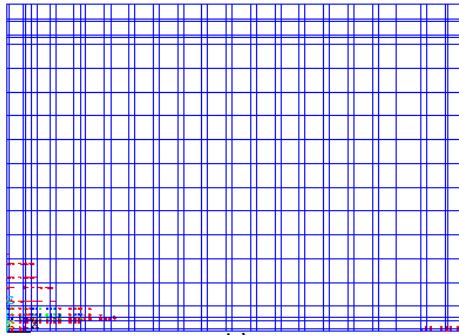
c)

Figura 6.19 a) Carga lateral Vs. distorsión lateral M11_C3_12VL, M15_C3_13VL y MBR_C3, b) Agrietamiento M11_C3_12VL, c) Agrietamiento MBR_C3

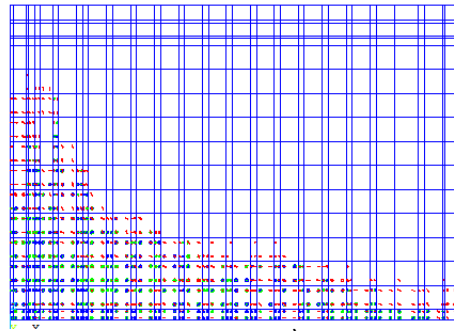
Con lo mencionado anteriormente el problema radica en que el muro de concreto pareciera rotar como un cuerpo rígido, dado que una de las esquinas del muro se levanta producto de la aplicación de la carga lateral, mientras que la otra esquina trata de hundirse en la losa, de tal forma que solo una pequeña porción del cortante es resistido por el muro, los demás los tiene que absorber la propia losa, en forma de las componentes de fuerza verticales y horizontales que el muro transmite a la losa.



a)



b)



c)

Figura 6.20 a) Carga lateral Vs. distorsión lateral M13_C3.75_12VL y MBR_C3.75
b) Agrietamiento M13_C3.75_12VL, c) Agrietamiento MBR_C3.75

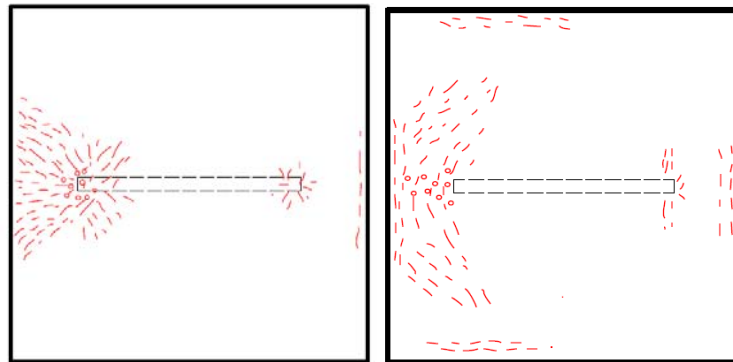
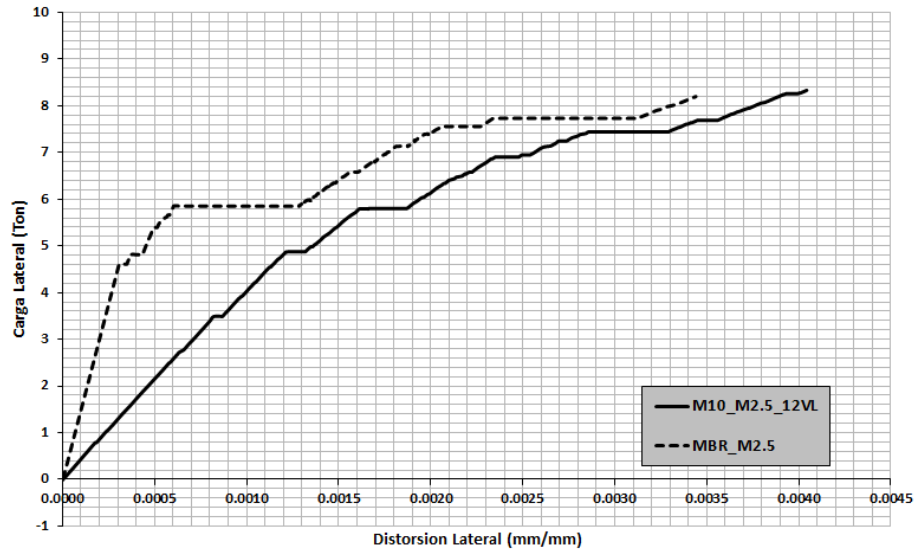


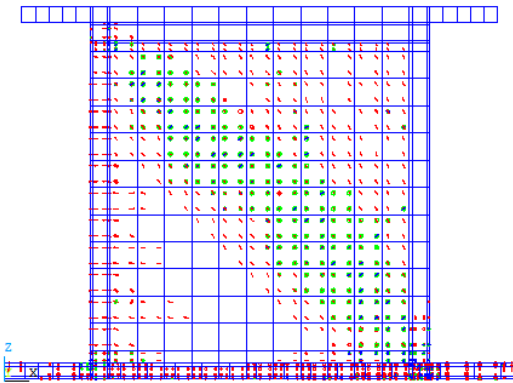
Figura 6.21 (Izq.) Patrón de agrietamiento provocado por el puntal de compresión ejercido por el muro, Modelo M11_C3_12VL (casa superior de la losa. (Der.) patrón de agrietamiento cara inferior.

6.7.2 SISTEMA CON MURO DE MAMPOSTERÍA

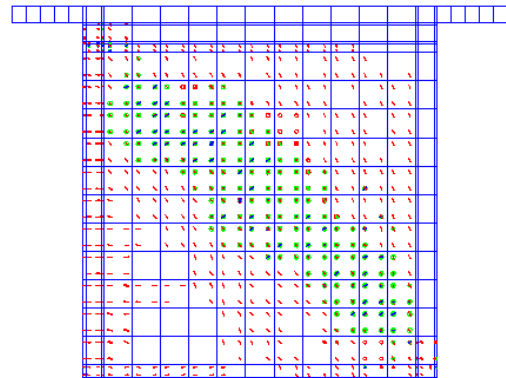
En los sistemas con muros de mampostería, el comportamiento es muy diferente a la observada y descrita en la sección anterior. Las diferencias en las curvas de los modelos muro-losa y los de base rígida siguen siendo notables pero ahora en menor medida.



a)



b)

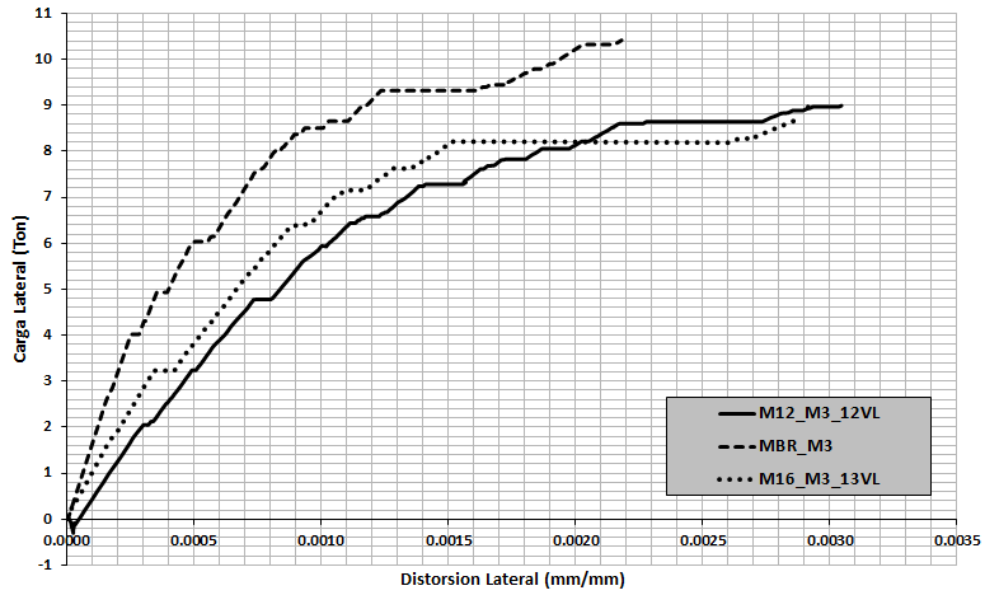


c)

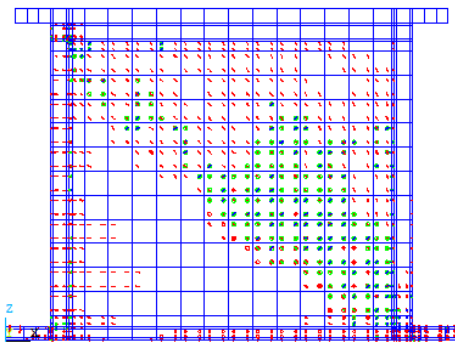
Figura 6.22 a) Carga lateral Vs. distorsión lateral M10_M2.5_12VL y MBR_MBR_M2.5
b) Agrietamiento M10_M2.5_12VL c) Agrietamiento MBR_M2.5

Las figuras 6.22.a, 6.23.a y 6.24.a muestran las curvas de capacidad de los sistemas analizados para muros de mampostería sobre base rígida y flexible.

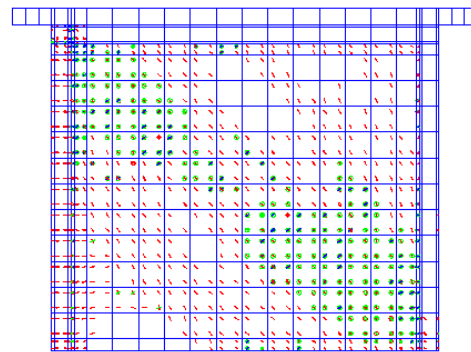
Se mantiene la Superioridad de los modelos sobre base rígida en cuanto a capacidad de carga lateral, aunque la diferencia ya no es tan grande como en los modelos de concreto, sin embargo sigue siendo muy notoria.



a)



b)



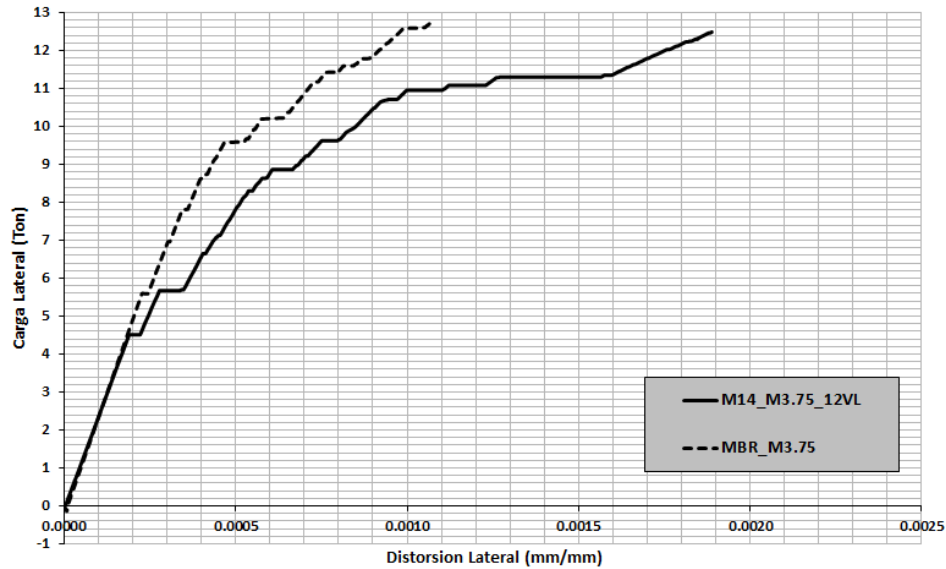
c)

Figura 6.23 a) Carga lateral Vs. distorsión lateral M12_M3_12VL, M16_M3_13VL y MBR_M3 b) Agrietamiento M12_M3_12VL, c) Agrietamiento MBR_M3

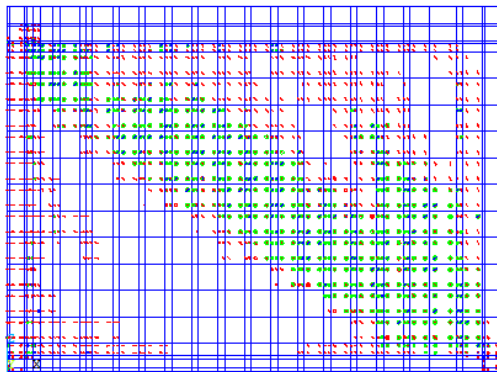
Acerca de la rigidez inicial de los sistemas, a excepción de los modelos con muro de 3.75 metros, se muestra que los modelos sobre base rígida son notablemente más rígidos.

Los esquemas de agrietamiento mostrados en las figuras 6.22, 6.23 y 6.24 indican gran similitud entre ambos sistemas analizados, notándose claramente la diagonal de compresión y el considerable agrietamiento por tensión en los castillos que están más próximos a la aplicación

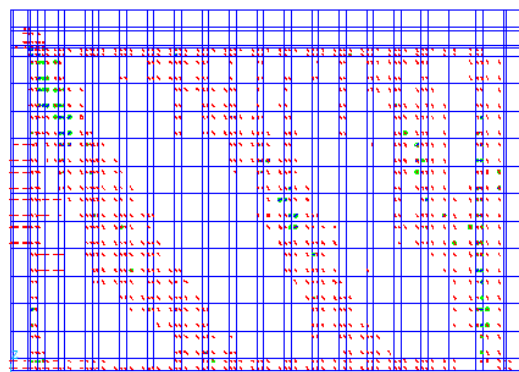
de la carga lateral, sin embargo dichos patrones de agrietamiento distan mucho de parecerse a los obtenidos para los modelos de muro de concreto, esto es de esperarse debido a la diferencia en el comportamiento de uno y otro sistema demostrados en la comparación de sus curvas de capacidad.



a)



b)



c)

Figura 6.24 a) Carga lateral Vs. distorsión lateral M14_M3.75_12VL y MBR_M3.75
b) Agrietamiento M14_M3.75_12VL, c) Agrietamiento MBR_M3.75

A diferencia de los muros de concreto, los muros de mampostería son incapaces de generar esfuerzos de punzonamiento en su esquina lo suficientemente grandes para poder aplastar el concreto de la losa en esta zona, debido a que la resistencia a corte de la mampostería es mucho menor que la del concreto, en este sentido se puede decir que a la mampostería no le

queda otra opción que soportar prácticamente todos el cortante generado por la carga lateral. Es por tal motivo que se observa en las figura 6.4, 6.6 y 6.9, que la deformación vertical que producida por el muro en la losa es mucho menor en los modelos de mampostería que en los modelos con muros de concreto.

En el *Apéndice D* se realiza un análisis de dos modelos a los que se le aplico carga cíclica uno de ellos, un modelo losa-muro con un muro de mampostería 2.50 metros de longitud .

6.8 ANÁLISIS DE RIGIDECES INICIALES

A lo largo del presente capitulo se ha comentado sobre la rigidez inicial que posee cada uno de los modelos analizados. Además, se ha hecho énfasis en las diferencias que existen al respecto entre los modelos de losa-muro y los de base rígida o entre los modelos de losa-muro con muro de mampostería y de concreto.

En la presente sección se muestran los resultados numéricos de los modelos estudiados y se comparan con las predicciones teóricas, se identifican diferencias y se hacen algunos comentarios.

Se entiende como rigidez inicial la relación que existe entre el cortante y el desplazamiento lateral, en el caso de muros es el generado en la estructura hasta el límite donde dicha estructura deja de presentar comportamiento lineal, dicha relación es mostrada en el modelo trilineal para muros de mampostería en la figura 6.25.

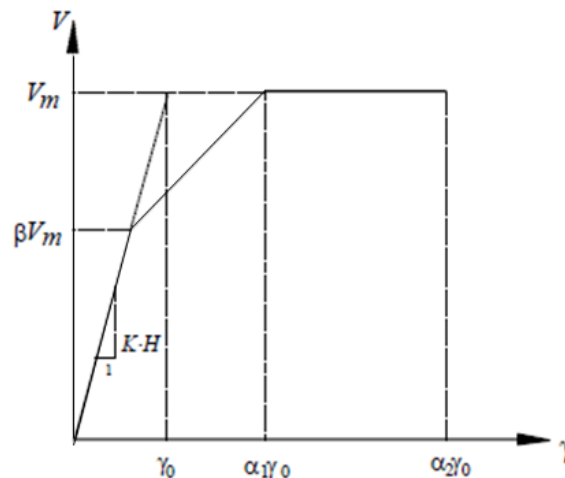


Figura 6.25 Modelo Trilineal para cargas Monótonas en muros de mampostería (Alcocer y Flores, 2001)

De la primera región del modelo trilineal se puede obtener la rigidez inicial del muro analizado sabiendo que la distorsión está dada por:

$$\gamma = \frac{\Delta}{H} \quad (6.2)$$

Donde Δ es el desplazamiento del muro en una esquina superior y H es la altura del mismo, también tenemos que:

$$K = \frac{V_m}{\Delta} \quad (6.3)$$

Dónde:

$K = \text{Rigidez inicial}$

$V_m = \text{Cortante Maximo en el limite elástico}$

$\Delta = \text{Desplazamiento Horizontal en una esquina superior del muro}$

Despejando en 6.2 para Δ y sustituyendo en 6.3 se obtiene la rigidez inicial en términos del cortante y la distorsión lateral:

$$K = \frac{V_m}{\gamma H} \quad (6.4)$$

Algunos autores como Meli (1975), y Alcocer y Flores (2001), consideran suficiente el uso de fórmulas simples de resistencia de materiales, de tal forma que la rigidez de los muros puede ser calculada como sigue:

$$\Delta = \frac{VH}{1.2AG} + \frac{VH^3}{\beta EI} \quad (6.5)$$

Despejando Δ de 6.3 e igualando con 6.5 se obtiene la rigidez inicial del muro:

$$K = \left(\frac{H^3}{\beta EI} + \frac{H}{1.2GA} \right)^{-1} \quad (6.6)$$

dónde:

$H = \text{altura libre del muro}$

$A = \text{area transversal del muro}$

$E = \text{modulo de elasticidad}$

$I = \text{momento de inercia de la seccion transversal}$

$G = \text{Modulo de rigidez a cortante}$

$\beta = \text{Factor de grado de acoplamiento, dala – losa}$

Con respecto al factor β , este puede variar de un valor de 3 a 12 dependiendo de las condiciones de borde en la parte superior del muro la figura 6.26 lo ilustra. Para los muros sobre base rígida se consideró un factor $\beta = 12$, que corresponde a la idealización de la figura 6.26.a.

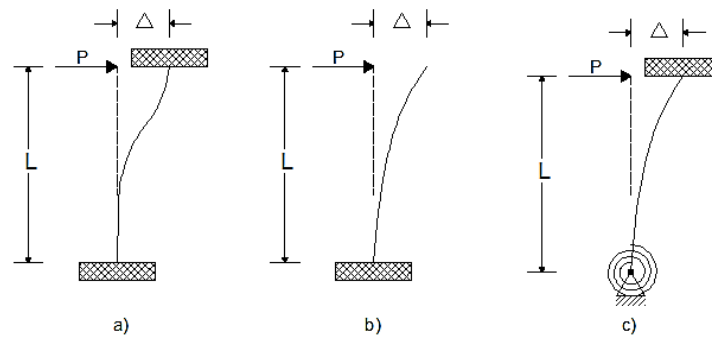


Figura 6.26 Idealización de las condiciones de borde

En el análisis de rigideces iniciales se hará énfasis en los modelos con muros de mampostería. La *tabla 6.3* presenta una comparación de la rigidez inicial teórica de los modelos sobre base rígida utilizando la *ecuación 6.6*, contra la rigidez inicial obtenida en los modelos de elementos finitos realizados también al suponer base rígida, estos últimos datos se obtuvieron directamente de las curvas de capacidad de cada modelo y luego se usó la *ecuación 6.4*.

Tabla 6.3 Comparación de rigidez inicial teórica con la obtenida en los modelos de E.F. para base rígida

MODELO	H(cm)	L(cm)	t(cm)	E (kg/cm ²)	G (kg/cm ²)	B	K(ec. 6.6) (ton/cm)	K(ec.6.4) E.F. (ton/m)
MBR_M2.5	250	250	12.50	15,000	6,000	12	53.57	61.33
MBR_M3	250	300	12.50	15,000	6,000	12	70.43	64.00
MBR_M3.75	250	375	12.50	15,000	6,000	12	95.52	97.39

En las últimas dos columnas de la *tabla 6.3*, se presentan los valores obtenidos para la rigidez inicial obtenidos teóricamente y los determinados con elementos finitos, Se observan valores muy parecidos para ambos casos.

Para evaluar la rigidez inicial teórica de los modelos muro-losa se utilizó de nuevo la *ecuación 6.6* pero en este caso con un valor de $\beta = 3$ (*figura 6.26.b*) debido a que en la interface de ambos elementos estructurales la losa no le proporciona al muro una restricción completa a la rotación, y este valor de 3 representa la condición extrema de flexibilidad que se tendría en el sistema muro-losa, por lo tanto este valor sería aproximado.

De hecho, una mejor idealización de las condiciones de borde en un sistema muro-losa se haya en la *figura 6.26.c*, en donde al sistema se le suprime la condición de empotramiento perfecto liberando el grado de libertad rotacional e imponiendo un resorte con una rigidez rotacional K_r .

cuya magnitud depende de las propiedades de la losa sobre la cual se apoya el muro, este aspecto es un tema de estudio para investigaciones futuras.

La *tabla 6.4* compara la rigidez teórica de los modelos losa-muro con los obtenidos de los modelos de elementos finitos llevados a cabo, teniendo en cuenta que la rigidez inicial teórica es aproximada por las razones que ya se mencionó. Se observa que aun utilizando la condición de voladizo que se tiene al asignar el valor de $\beta = 3$ y la cual resulta en rigideces más bajas, los valores de la última columna de la tabla 6.4 que representan los modelos de sistema muro-losa son mucho menores a excepción del modelo con muro de 3.75 metros de longitud por razones ya explicadas.

Tabla 6.4 Comparación de rigidez inicial teórica con la obtenida en los modelos de E.F. para sistema muro-losa

MODELO	H(cm)	L(cm)	t(cm)	E (kg/cm ²)	G (kg/cm ²)	β	R(ec. 6.6) (ton/cm)	R(ec.6.4) E.F. (ton/m)
M10_M2.5_12VL	250	250	12.50	15,000	6,000	3	28.85	14.50
M12_M3_12VL	250	300	12.50	15,000	6,000	3	42.63	26.30
M14_M3.75_12VL	250	375	12.50	15,000	6,000	12	95.52	90.00
M16_M3_13VL	250	300	12.50	15,000	6,000	3	42.63	38.79

Más notable resulta el contraste de rigideces entre ambos sistemas estudiados si se comparan uno a uno los valores obtenidos en las últimas columnas de las *tablas 6.3 y 6.4* de acuerdo con su longitud de muro, por ejemplo si se cotejan los valores para el modelo MBR_M2.5 y M10_M2.5_12VL, en donde se tienen valores de rigidez inicial de 61.63 y 14.50 ton/cm respectivamente, llegando a ser el primero apenas el 25% aproximadamente del modelo sobre base rígida.

6.9 ESTADOS LÍMITES PARA LOS MODELOS MURO-LOSA ANALIZADOS

Uno de los factores claves en el estudio de la capacidad de cualquier estructura es establecer estados límites de comportamiento ante determinada solicitación con el fin de fijar parámetros de diseño para que dicha estructura no sobrepase o se exceda de cierto límite que podría resultar en un comportamiento inconveniente o indeseado. Por tal motivo en la presente sección se proponen los estados límites para los modelos de losa-muro analizados en esta tesis.

6.9.1 CURVAS DE CAPACIDAD NORMALIZADAS

Para elaborar las curvas normalizadas se optó por separar los modelos según el material que compone el muro (mampostería y concreto) esto debido a que ambos sistemas presentan comportamientos muy distintos como lo muestran las *figuras 6.11 y 6.12*.

Para normalizar las curvas y la gran cantidad de datos obtenidos en los análisis se propone empíricamente la siguiente expresión:

$$\xi = 1 \times 10^{-4} \gamma L^3 \quad (6.7)$$

También:

$$\gamma = 1 \times 10^4 \xi / L^3 \quad (6.8)$$

dónde:

ξ = *factor de normalización*

γ = *distorsión lateral del muro*

L = *Longitud del muro*

En las figuras 6.27 y 6.28 se muestran las gráficas del factor de normalización ξ contra la carga normalizada P/P_f donde P es la carga lateral en el sistema en cualquier punto durante el proceso de carga mientras que P_f es la carga lateral final aplicada al modelo.

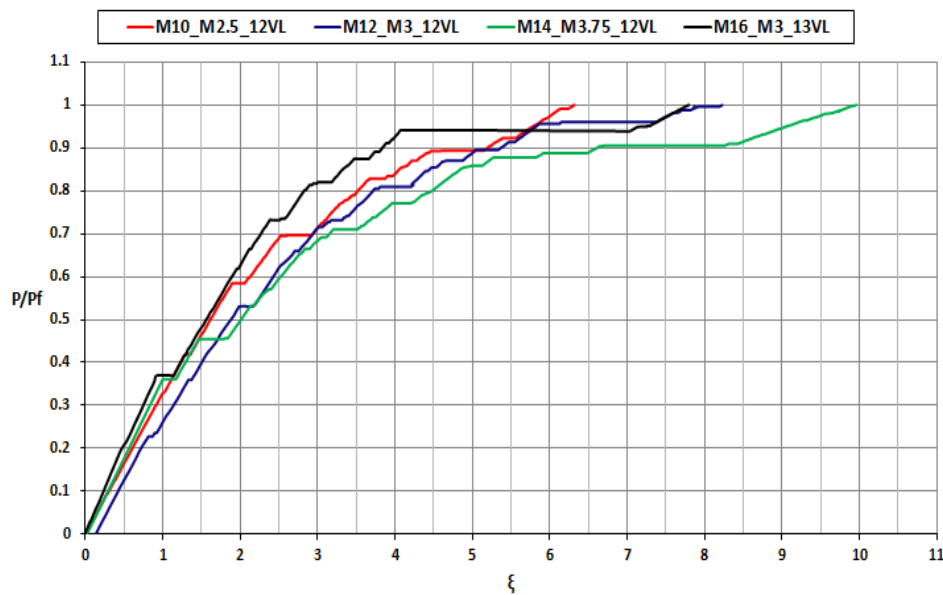


Figura 6.27 Curvas de Capacidad Normalizadas para modelos losa-muro con muro de mampostería

Para determinado valor de ξ obtenido de las figuras 6.27 y 6.28, y sustituyéndolo en la ecuación 6.8 se obtiene la distorsión en la curva de capacidad real para cualquier modelo muro-losa (figuras 6.11 y 6.12). No se ha incluido en la gráfica de la figura 6.28 el modelo M13_C3.75_12VL, por el motivo de que dicho modelo presenta un comportamiento muy diferente a los demás modelos con muros de concreto, por razones que ya han sido expuestas.

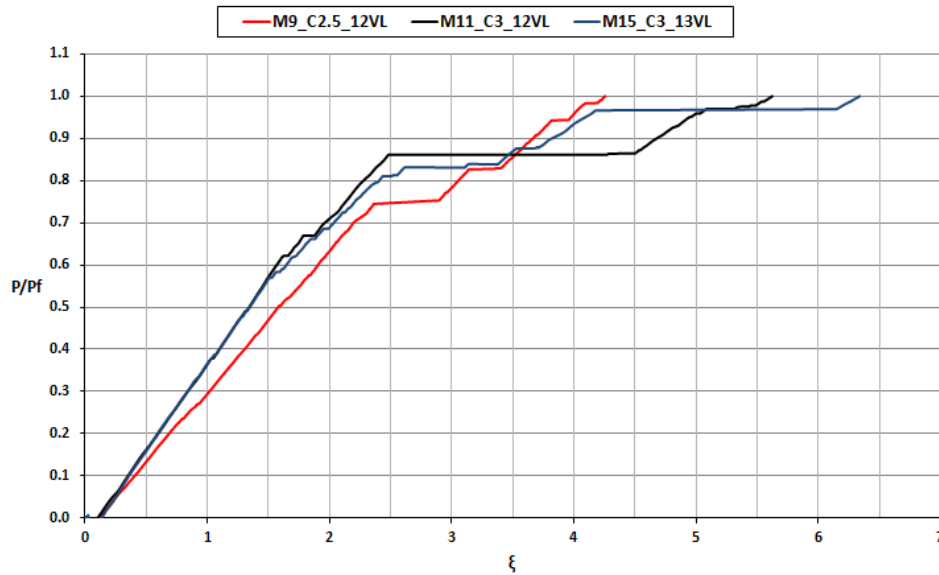


Figura 6.28 Curvas de Capacidad Normalizadas para modelos losa-muro con muro de concreto

6.9.2 ESTADOS LÍMITES PROPUESTOS

La figura 6.13 muestra el comportamiento de los diferentes modelos analizados en este capítulo observándose mucha diferencia entre uno y otro. Se pueden establecer los estados límites de cada modelo en forma individual pero esto nos llevaría a tener una gama de condiciones que resultarían poco útiles y difíciles de interpretar. Por tal razón en la sección anterior se normalizaron los comportamientos de los modelos de tal modo que se puedan evidenciar patrones o límites aproximados que sean válidos para todos los modelos analizados.

En la figura 6.29 se presentan las mismas graficas normalizadas de la figura 6.27, pero se establecen los estados límites del comportamiento generalizado de los modelos muro-losa en los cuales el muro es de mampostería.

Se proponen cinco estados que van desde el estado leve hasta un estado grave en nivel II, en donde en este último estado límite se tiene cierta incertidumbre acerca del estado de colapso del sistema ya que en los modelos construidos no se incluye una condición de colapso, sin

embargo es seguro según lo muestran los esquemas de agrietamiento que efectivamente a ese punto la estructura cuenta con un daño considerable.

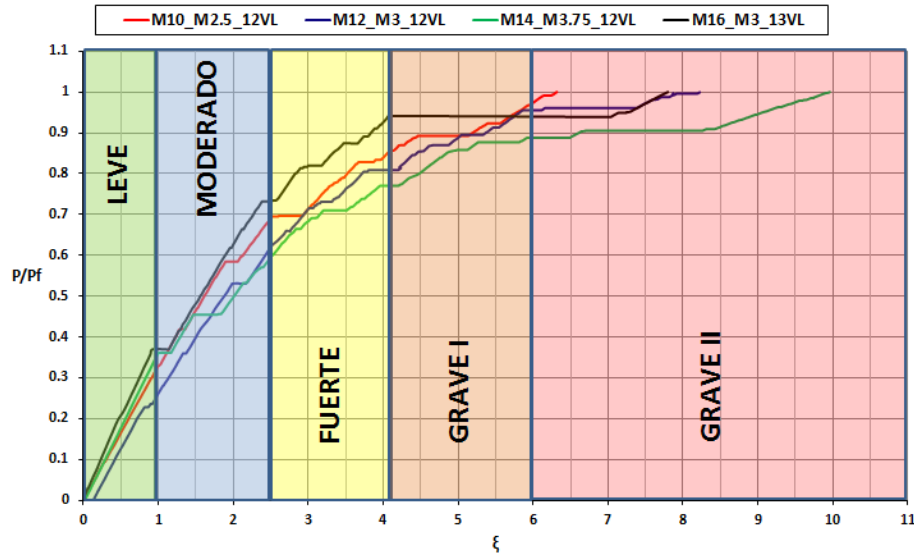


Figura 6.29 Estados límites para modelos muro-losa con muro de mampostería

En el *Apéndice C* se presenta en detalle el criterio usado para definir los diferentes estados límites y las condiciones de agrietamiento al final de cada estado para dos modelos determinados, uno con muro de mampostería y otro con muro de concreto, así como una breve descripción de cada uno. Para los modelos con muro de concreto se presenta la *figura 6.30* en donde al igual que en la *figura 6.29*, se proponen 5 niveles o estados limite.

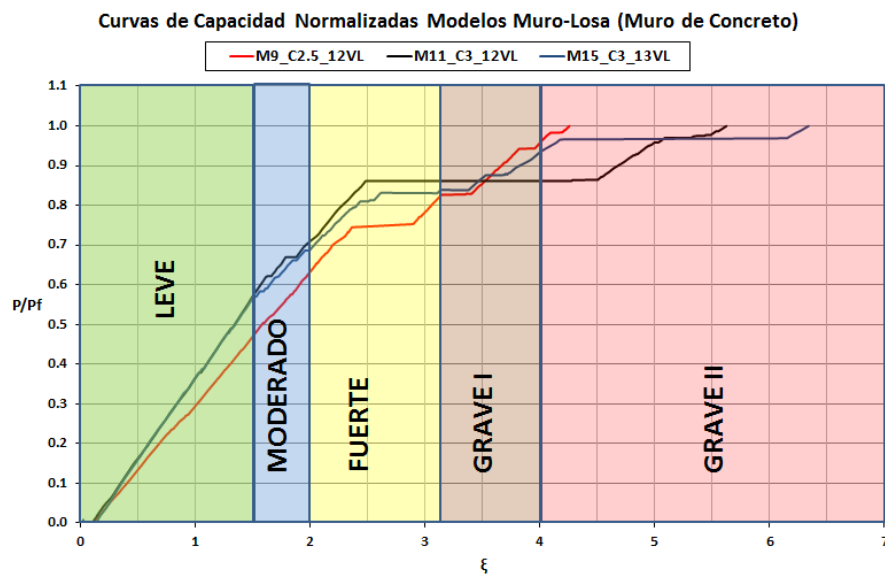


Figura 6.30 Estados límites para modelos muro-losa con muro de concreto

En las Tablas 6.5 y 6.6 se presentan los valores de ξ correspondientes a cada estado límite así como la respectiva distorsión al final de cada estado límite propuesto para los modelos con muro de mampostería y concreto.

Tabla 6.5 Estados límites para modelos muro-losa con muro de mampostería

MODELO	LEVE		MODERADO		FUERTE		GRAVE I		GRAVE II	
	ξ	Υ	ξ	Υ	ξ	Υ	ξ	Υ	ξ	Υ
M10_M2.5_12VL	1	0.0006	2.5	0.0016	4	0.0026	6	0.0038	>6	----
M12_M3_12VL	1	0.0004	2.5	0.0009	4	0.0015	6	0.0022	>6	----
M14_M3.75_12VL	1	0.0002	2.5	0.0005	4	0.0008	6	0.0011	>6	----
M16_M3_13VL	1	0.0004	2.5	0.0009	4	0.0015	6	0.0022	>6	----

Tabla 6.6 Estados límites para modelos muro-losa con muro de concreto

MODELO	LEVE		MODERADO		FUERTE		GRAVE I		GRAVE II	
	ξ	Υ	ξ	Υ	ξ	Υ	ξ	Υ	ξ	Υ
M9_C2.5_12VL	1.5	0.0010	2.0	0.0013	3.2	0.0020	4	0.0026	>4	----
M11_C3_12VL	1.5	0.0006	2.0	0.0007	3.2	0.0012	4	0.0015	>4	----
M15_C3_13VL	1.5	0.0006	2.0	0.0007	3.2	0.0012	4	0.0015	>4	----

6.10 DISCUSIÓN

En el presente capítulo se ha evaluado el comportamiento ante carga lateral de un sistema losa muro en donde le muro se encuentra simétricamente localizado al centro del claro de la losa, de los cuales se pueden destacar algunos puntos:

Se estableció la gran diferencia que existe entre los modelos losa-muro con muro de mampostería y de concreto. A través de las curvas de capacidad generadas para estos modelos se pudo determinar grandes contrastes en capacidad de carga y rigidez inicial, siendo los modelos con muros de concreto superiores en ambos aspectos.

Además, se logró identificar cuál es el elemento (losa o muro) dentro de cada modelo que determina la capacidad total del sistema ante carga lateral. En los modelos con muro de concreto se observó que la resistencia de la losa define la capacidad del sistema, en vista de que primero falla ésta antes que el muro de concreto que por su gran rigidez genera un puntal de compresión en la esquina inferior opuesta a la de la aplicación de la carga, este puntal genera esfuerzos muy elevados y en forma concentrada que provocan aplastamientos en la esquina del muro y fisura de forma considerable la losa.

Por otra parte, se observó que en los modelos con muro de mampostería, es este el que determina la capacidad lateral del sistema, experimentando la losa desplazamientos verticales menores en el puntal de compresión y por ende esfuerzos menores, y el muro en este caso si sufre daños considerables producto del desplazamiento lateral.

Respecto al análisis de las diferencias en el comportamiento entre un sistema losa-muro y un sistema de muro apoyado sobre base rígida, se encontraron grandes diferencias entre ambos sistemas analizados. En los sistemas sobre base rígida se tienen valores muy superiores en capacidad de carga lateral y en rigidez inicial respecto los modelos muro-losa.

Para reforzar lo dicho en el párrafo anterior nos referimos a las tablas 6.3 y 6.4 en donde si se realiza una comparación porcentual de las rigideces iniciales en ambos sistemas se tendría que la rigidez inicial de modelo muro-losa de mampostería (*M10_M2.5_12VL*) es apenas 24% de la rigidez inicial del mismo muro sobre base rígida (*MBR_2.5*), 41% si se comparan los modelos con muro de 3 metros de longitud y 92% para los sistemas con muro de 3.75 metros de longitud.

Sin embargo no es posible establecer con claridad la diferencia en capacidad de deformación por razones ya discutidas. No obstante, a ese respecto, en los modelos con muro de concreto el sistema losa-muro, a pesar de tener gran resistencia, tiene la desventaja de estar bastante limitado a experimentar desplazamientos laterales, ya que estos son directamente proporcionales al daño que la losa pueda experimentar.

Referente a los modelos con muro de mampostería aunque no se determinó el desplazamiento último o de colapso los modelos losa-muro aparentan tener ligeramente un capacidad mayor a deformarse lateralmente debido en gran medida a la flexibilidad de la losa que ayuda a que el muro pueda desplazarse lateralmente en un porcentaje un poco mayor al muro apoyado sobre base rígida, sin embargo esta aparente ventaja dependerá de cómo este interactuando el muro con el edificio en su conjunto.

En con los estados limites propuestos en este capítulo se debe mencionar que no es posible establecer clasificaciones estándar de daño en base a distorsiones como por ejemplo las propuestas por Ruiz-García et al., 1998 o Astroza y Schmidt, 2004, en donde generalizan estados límites para muros de mampostería confinados en base a distorsiones. Sin embargo en el caso de los sistemas muro-losa no es posible generalizar ya que los niveles de daño se ven afectados por una diversidad de factores tales como el espesor de la losa que se relaciona con la rigidez de la misma, el tipo de material que conforma el muro, la relación porcentual entre la longitud del muro y el claro de la losa entre otros.

Por tales motivos los estados límites en los sistemas losa-muro se establecieron a través de un factor ξ obteniendo resultados bastante satisfactorios al normalizar las curvas de capacidad de cada modelo, de tal forma que se pudo establecer de forma clara los estados límites en los modelos realizados.

CAPÍTULO 7

Diseño del proyecto experimental

7.1 INTRODUCCIÓN

Como parte de esta tesis, se presentan en este capítulo los detalles del diseño de un proyecto experimental. El proyecto del primer espécimen consiste en ensayar un sistema muro-losa (idéntico al modelo M10_M2.5_12VL), apoyado perimetralmente en trabes robustas, y sometido a la combinación de carga vertical y horizontal simultáneas.

Actualmente, la construcción del primer espécimen se realiza en el laboratorio de estructuras de la UAM-Azcapotzalco.

La carga vertical simula la carga de servicio equivalente a la de un edificio de 5 niveles sobre la losa. Se decidió usar una carga de este tipo en vista de que es el número de niveles promedio de los edificios que se construyen con este tipo de estructuración. En cuanto a la carga horizontal, el espécimen es sometido a cargas cíclicas laterales para el estudio y análisis del comportamiento sísmico del sistema.

En este capítulo se expone el alcance de las pruebas experimentales, así como el criterio de dimensionamiento del espécimen de prueba. También, se presenta el diseño de los diferentes elementos que conforman el proyecto como ser el diseño y revisión del muro reforzado de mampostería, la losa de transferencia de concreto, las trabes que sostienen el espécimen. Además se detallan los dispositivos de carga, los tipos de cargas y el patrón de carga que se le impondrá al espécimen de prueba.

7.2 ALCANCE DEL PROYECTO EXPERIMENTAL

El proyecto experimental ha sido pensado para el estudio de losas de transferencia las que son solicitadas por muros de carga, los cuales usualmente transmiten la carga directamente a la losa y no a vigas como convencionalmente se recomienda, tales cargas pueden ser verticales y laterales.

Se pretende estudiar en primer lugar, el estado del sistema en condiciones de servicio ante carga vertical, en segundo lugar, la respuesta del sistema ante carga lateral en combinación con la carga vertical de servicio.

Además, se busca determinar cómo se distribuye la carga vertical del muro sobre la losa, así como el efecto de las deflexiones que la carga provoca sobre el muro. Debido a que se ha observado en este tipo de estructuras, que los muros, en especial, en los niveles inferiores desarrollan agrietamientos importantes y esfuerzos cortantes excesivos.

Además, otro de los puntos críticos a estudiar en este tipo de estructuras, es el anclaje entre el muro de la planta baja y la losa de transferencia. Para ello el muro que es parte del espécimen está confinado, como generalmente se realiza en la práctica, por dos castillos de concreto reforzado que son los que con su armado de acero propician el anclaje muro-losa. El tema del anclaje resulta ser de gran importancia especialmente cuando la estructura es sometida a cargas laterales de sismo o de viento.

7.3 CRITERIOS DE DISEÑO DEL ESPÉCIMEN DE PRUEBA

7.3.1 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

A continuación se describen las propiedades principales de los materiales para la construcción del espécimen de prueba:

7.3.1.1 Mampostería

Para la construcción del muro de mampostería del espécimen, se propone utilizar tabiques de barro recocidos con dimensiones de promedio de 12.5x6x23 cm. El espesor de las ligas o juntas del muro se limitan de 1.20 a 1.50 cm construidas con mortero tipo III, de acuerdo con las NTCC-2004. Para fines de diseño se considera una mampostería con resistencia $f_m^* = 50 \text{ kg/cm}^2$, sin embargo este valor se ajustará según las pruebas de laboratorio que se realicen a los materiales de construcción.

7.3.1.2 Concreto

Para el espécimen de prueba se recomienda utilizar dos tipos de concreto, clase 1 y 2 según las NTCC para diseño y construcción de Estructuras de Concreto. Concreto clase 1 se usará en la losa y las trabes de apoyo con una resistencia a la compresión de 250 kg/cm², para los castillos y la dala, un concreto clase 2 con una resistencia a la compresión de 200 kg/cm². El diseño de las mezclas de concreto se muestran en el *Apéndice A*.

7.3.1.3 Acero de Refuerzo

En la construcción y diseño del espécimen se utilizó acero de refuerzo grado 42 de diferentes diámetros tanto para acero transversal como longitudinal. Se realizaron pruebas de tensión al acero para verificar su resistencia, y de esta forma eliminar alguna incertidumbre que se podría generar al respecto. El detalle y resultado de las pruebas se describen en el *Apéndice A*.

7.3.2 DIMENSIONAMIENTO DEL ESPÉCIMEN

Respecto al dimensionamiento del espécimen se buscó representar de la forma más realista lo que ocurre en una losa de un edificio estructurado con losa de transferencia, es decir reproducir las técnicas de construcción, resistencia de materiales utilizados, condiciones de carga tanto verticales como horizontales, así como sus dimensiones geométricas.

Sin embargo el tamaño y forma del espécimen está limitado por la disponibilidad de espacio y condiciones con las que se cuenta en el laboratorio de Estructuras en donde se llevarán a cabo las pruebas.

El espécimen consta de cuatro trabes coladas monolíticamente con la losa de prueba de 12 cm, tales trabes sirven de apoyo a la losa, dos de las cuales son acarteladas, más adelante se justificará su elección. Las cuatro trabes se encuentran simplemente apoyadas en el suelo de concreto del laboratorio.

Debido a que no fue posible anclar las vigas al piso de manera directa, se tuvo que diseñar dispositivos de anclaje adecuados para que el espécimen no fuera desplazado horizontalmente una vez que se le aplicaran las cargas laterales. Las trabes acarteladas tendrán anclaje vertical con perfiles de acero HSS anclados a la losa del Laboratorio.

El muro de mampostería confinado sobre la losa se construirá a la mitad del claro, dicho muro tiene una longitud de 2.50 ms, incluyendo los castillos confinantes y una altura de 2.50 m, que incluye el espesor de la dala. Los castillos y la dala son de dimensiones de 12.5x15 cm. Aunque la altura de 2.50 m del muro queda limitada por la posición del dispositivo de carga lateral en el marco de reacción, se considera como adecuada por ser un valor aproximado a las alturas de los edificios de vivienda de mampostería.

La figura 3.1 muestra algunos de los componentes principales de la prueba de laboratorio, sin demasiados detalles en vista de que cada uno de los componentes del espécimen será explicado más adelante.

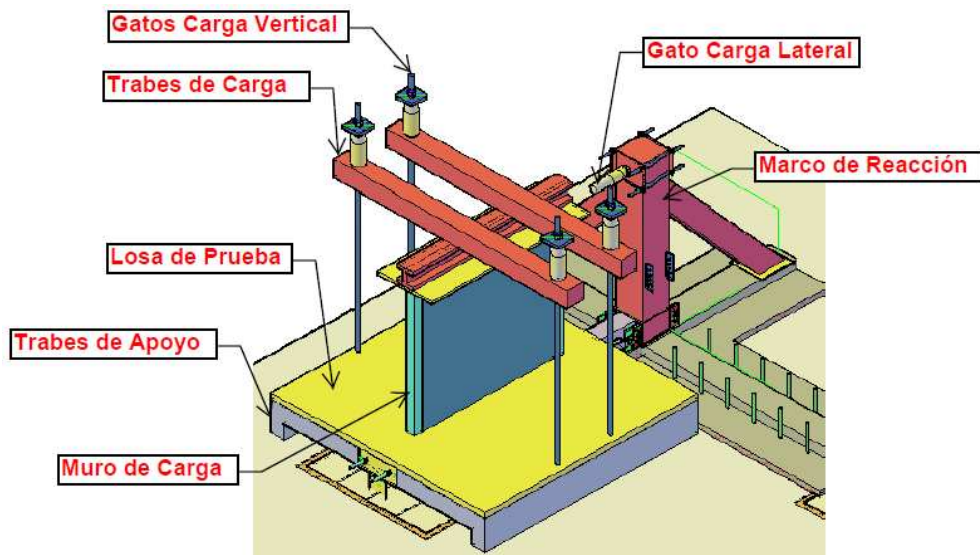


Figura 7.1 Dibujo en 3D del espécimen de prueba

Las figuras 7.2 y 7.3 muestran las dimensiones del espécimen en planta, perfil y transversalmente. No obstante, se debe mencionar que el espécimen posee dimensiones a escala real, dado que se trata de representar de la forma más precisa posible lo que ocurre en el panel de una losa transferencia de un edificio de cinco niveles sometido a cargas directas de un muro de carga.

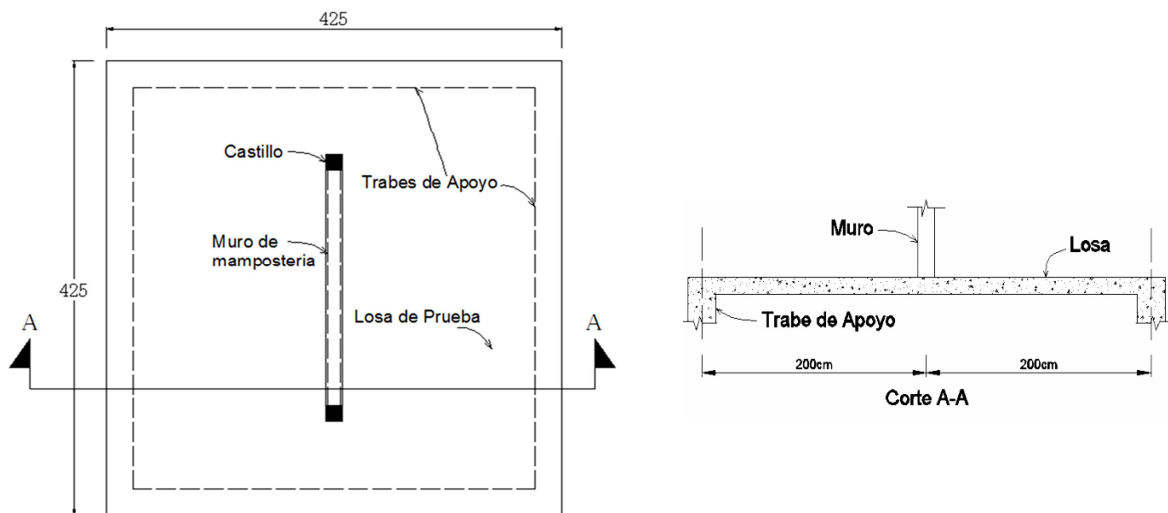


Figura 7.2 Vista superior y corte transversal del modelo de prueba

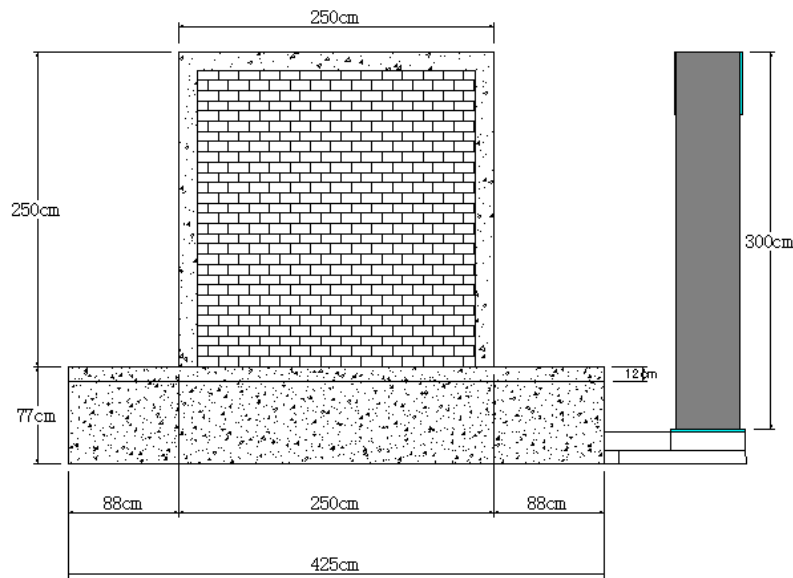


Figura 7.3 Vista lateral del espécimen

7.3.3 CONDICIONES DE APOYO DEL ESPÉCIMEN

El peso total del espécimen descansa sobre cuatro trabes de concreto reforzado (*figura 7.1*), a su vez estas trabes se encuentran simplemente apoyadas sin ningún tipo de anclaje sobre el firme de concreto del laboratorio. Esta situación implica se diseñe un dispositivo de anclaje adecuado para evitar el deslizamiento horizontal del espécimen cuando sea aplicada la carga lateral. Para el diseño del dispositivo de anclaje horizontal se desprecia la contribución del efecto de fricción entre las superficies inferiores de las cuatro trabes de apoyo y el firme de concreto del laboratorio.

La condición de apoyo de la losa de prueba, se considera empotrada en sus cuatro extremos en vista de que será colada monolíticamente con las trabes de apoyo. Respecto al muro de carga, como se observa en la *figura 7.3*, aunque sus castillos no se colarán al mismo tiempo que la losa, se podrían considerar como empotrados en vista de que el acero de refuerzo se encuentra dentro de la losa.

Referente al muro en su parte inferior los tabiques de barro recocido que componen el muro de mampostería simplemente estarán separados de la losa y adheridos a la misma por una liga de mortero de aproximadamente 1.50 centímetros de espesor.

7.3.4 CONDICIONES DE CARGA DEL ESPÉCIMEN

El experimento fue planeado para someter el espécimen a cargas verticales sostenidas con el fin de simular la carga que genera un edificio de cinco niveles sobre el piso de transferencia, en

donde se han tomado en cuenta el peso de los muros, losas de entrepiso cargas viva, muerta y accidentales, tales cargas son generadas por cuatro gatos hidráulicos como se puede apreciar en la *figura 7.1*.

Para lograr lo anterior, se dispuso poner una trabe de acero sobre el muro con el fin de distribuir de forma uniforme la carga vertical de los cuatro gatos hidráulicos, siguiendo esa misma idea se colocaron las trabes de carga a un cuarto de la longitud del muro en ambos extremos. Además, se construyó una losa de 10 cm de espesor con el fin de simular la losa superior que tiene el muro en cualquier construcción.

Además, de lo anterior se aplicará una carga lateral cíclica a través de un gato hidráulico de doble acción al mismo tiempo que la carga vertical sostenida, esto para observar el comportamiento sísmico de la losa y del muro, y para determinar la eficiencia del anclaje losa-muro.

7.4 DISEÑO DEL ESPÉCIMEN

7.4.1 DISEÑO DEL MURO DE MAMPOSTERÍA CONFINADA REFORZADA

7.4.1.1 DIMENSIONES DEL MURO

El muro estará confinado por castillos de concreto de 12.5x15 cm., con una separación entre ejes de 235 cm. además de una dala en la parte superior. Se considera un espesor para el muro de 12.5 cm. La altura del Muro será de 2.50 m. incluyendo la dala la cual posee dimensiones idénticas a las de los castillos.

7.4.1.2 CARGA VERTICAL DE DISEÑO

Se considera para el diseño la carga equivalente a un edificio destinado a oficinas de cinco pisos con losas de entrepiso de concreto de 10 cms. de espesor. Considerando que el muro carga un área tributaria de 7.50 m², al calcular la bajada de cargas del edificio incluyendo cargas vivas según reglamento para un edificio de oficinas y carga muerta, se tiene una carga de compresión axial última sobre el muro de 43.80 ton, aunque esta carga no será aplicada, ya que se aplicara una carga de servicio de alrededor de 10 ton.

7.4.1.3 REFUERZO DE CASTILLOS Y DALA

Para confinar la mampostería se utilizaron castillos de concreto de 12.5x15 centímetros, con $f'_c = 200 \text{ kg/cm}^2$, reforzados con cuatro barras de 3/8" colocadas en las esquinas. Se procuró que el acero de refuerzo longitudinal cumpliera con los requerimientos mínimos de área de

refuerzo totalizando por castillo una área de 2.84 cm^2 mayor que 2.14 cm^2 requeridos para este caso según las NTCM-2004.

El esfuerzo de fluencia del acero utilizado para los castillos es de $4,200 \text{ kg/cm}^2$. La dala utilizada para el confinamiento superior del muro posee las mismas características de refuerzo y dimensiones que los castillos. Para esta prueba no se considera refuerzo horizontal para cortante en el muro siendo este confinado sin refuerzo horizontal.

7.4.1.4 ACERO DE REFUERZO DE LA LOSA DE PRUEBA

Para el armado de acero y tratando de representar lo mejor posible lo que se utiliza en las construcciones, se decidió utilizar una distribución de refuerzo uniforme, es decir el mismo armado de acero en ambas direcciones.

Con base en la revisión de planos estructurales de varios edificios con losa de transferencia construidos en la Ciudad de México, se optó utilizar un armado de refuerzo típico de tales edificios que consiste en barras de acero del No. 3 espaciadas a cada 20 cm en el lecho inferior para resistir momento positivo; en tanto en el lecho superior para resistir momento negativo se dispuso de un arreglo en donde se intercalan varillas que han sido dobladas del lecho inferior (los llamados “columpios”) a cada 40 cm con “bastones” del mismo diámetro, los cuales también están espaciados a 40 cm en los cuatro bordes de la losa.

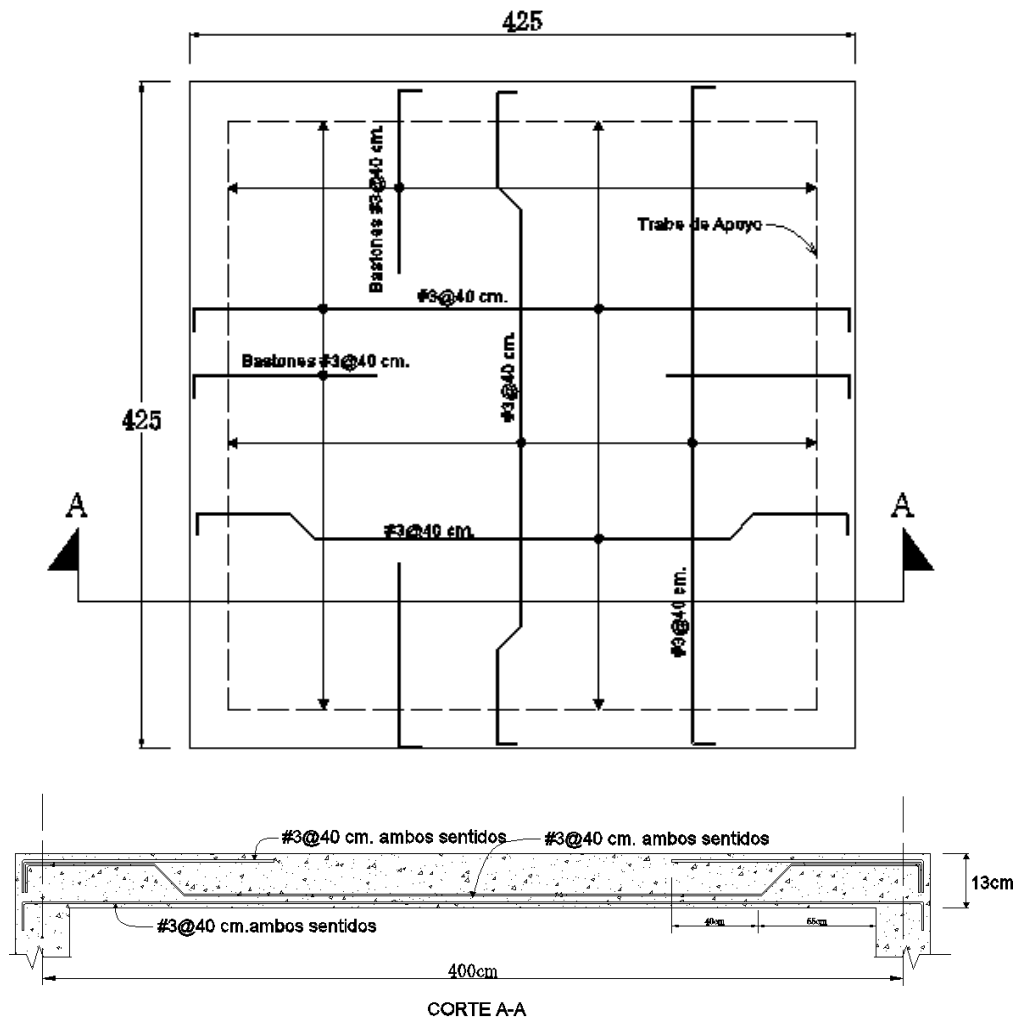
El armado de la losa, de anclajes y ganchos estándar se diseñaron conforme a las NTCC-2004 del Distrito Federal. La *figura 3.4* nos en detalle el armado de la losa en planta y en un corte.

7.4.1.5 REVISIÓN DEL MURO DE MAMPOSTERÍA

7.4.1.5.1 Revisión por Cargas Verticales

La carga vertical aplicada al muro simula la que recibe un muro de planta baja de cinco niveles de altura. Se ha estimado que sobre el muro carga una área tributaria de 7.50 m^2 . Se decidió utilizar dicha área para diseño, dado que de acuerdo a los diferentes planos de edificios estudiados, se encontró que es un área tributaria promedio para un muro de carga.

De acuerdo a las condiciones de carga se considera al muro como interior, por lo que el coeficiente $k = 0.80$. En la *sección 7.4.1.2* se estableció que la carga máxima última de compresión que soportara el muro es de 43.80 ton.



Nota: Bastones y Cumpios intercalados y separados a cada 20 cms. en ambos sentidos

Figura 7.4 Detalle de armado de refuerzo de la losa de prueba

Ahora se hace la revisión considerando indirectamente la contribución de los castillos con la siguiente expresión:

$$P_R = F_R F_E (f_m + 4) A_T \quad (7.1)$$

Donde, según las NTCM-2004, $F_R = 0.60$ y F_E esta dada por:

$$F_E = \left[1 - \frac{2e'}{t} \right] \left[1 - \left(\frac{kH}{30t} \right)^2 \right] \left(1 - \frac{H}{L'} \right) + \frac{H}{L'} \leq 0 \quad (7.2)$$

$$e' = \frac{12.5}{24} = 0.52 \text{ cm}$$

Con respecto al factor de reducción F_R se debe hacer una corrección en vista de que estos factores de reducción toman en cuenta la inexactitudes constructivas y resistencia de los materiales menor a la nominal entre otras, pero en vista de que se trabajó en un laboratorio bajo condiciones controladas y sabiendo con gran aproximación la resistencia de los materiales utilizados se tomara el valor de $F_R = 1$. Sustituyendo en 7.2 para determinar F_E se obtiene un valor de 0.90, por lo tanto la carga de compresión resistente del muro es:

$$P_R = (1)(0.90)(50 + 4)(3125)/1000 = 151.87 \text{ ton} > P_{uPb} = 43.80 \text{ ton} \rightarrow O.K.$$

Tomando la contribución directa de los castillos:

$$P_R = F_R F_E (f * _m A_T + \Sigma A_s f_y) \quad (7.3)$$

Sustituyendo en :

$$P_R = (1)(0.90)(50 \times 3000 + 5.68 * 4200)/1000 = 156.47 \text{ ton}$$

$$156.47 \text{ ton} > P_{uPb} = 43.80 \text{ ton} \rightarrow O.K.$$

Por lo que se concluye que el muro cumple por el requisito de carga axial.

Sobre este aspecto hay que hacer una acotación, ya que el cálculo de la capacidad ante carga vertical se basa en que el muro está apoyado sobre base rígida y no se incluye el efecto de la flexibilidad de la losa. De hecho según los análisis realizados en el *capítulo 5* en el caso del espécimen que se está diseñando (M12_M2.5_12V) si solo se considera carga vertical, las ecuaciones 7.1 a 7.3 siguen siendo válidas para el cálculo de la capacidad del muro, en vista de que según los resultados, difícilmente el muro llegara a su carga ultima vertical ante que eso la losa fallaría, incluso como se ve en la figura 5.5 del capítulo 5 la losa falla a una carga vertical de alrededor de 25 toneladas, la cual es mucho menor que la resistencia ultima del muro.

7.4.1.5.2 Revisión por Distorsión

Según los resultados del modelo analizado M10_M2.5_12VL del *capítulo 6* se espera una carga lateral máxima en el sistema losa-muro de 7 a 8 ton combinada con la carga de servicio vertical, así como distorsiones finales mayores a 0.4%.

Es posible que aplicar métodos estándar como el de la columna ancha equivalente o el de la diagonal equivalente para estimar las distorsiones finales del espécimen, no den resultados satisfactorios. En primer lugar porque son métodos elásticos y en segundo lugar y no menos importante porque no se consideran las rotaciones que experimenta el muro producto de la flexibilidad de la losa de apoyo.

Sin embargo para fines comparativos, se realizó el cálculo con el método de la columna ancha equivalente para obtener la distorsión que corresponde al límite elástico lineal del sistema losa-muro. Según la figura 6.3 del capítulo 6, la carga lateral que corresponde al límite elástico lineal es aproximadamente 4.80 ton con una distorsión de 0.12% para esa carga.

Tabla 7.1 Propiedades del Muro

Lmuro (cm) =	250	Espesor(cm)=	12.5
hmuro(cm) =	250	Castillos =	12x15 cm
f*m (kg/cm2) =	50	Dala =	12x15 cm

Carga lateral considerada = 4.80 ton y $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$ para los castillos y a la dala.

Resultados del método de la columna ancha equivalente para revisar el muro por distorsión

Tabla 7.2 Propiedades equivalentes de la columna ancha

Am(cm²) =	2,750	Aceq(cm²) =	933.75
Ac(cm²) =	180	Ieq(cm⁴) =	4,356,000
λ=	1.85	φy =	2.53
ζ=	0.94		

Tabla 7.3 Rotación y distorsión para una carga lateral de 4.80 ton

θ1 =	-0.0006	rad/cm
u1 =	0.2755	cm

La distorsión lateral en el muro bajo una carga de 4.8 ton es de 0.11%. Al comparar ambos valores de distorsión para el rango elástico 0.12%, según el modelo del capítulo 6 y 0.11% según el método de la columna ancha equivalente, se observa una gran coincidencia entre ambos resultados. Se puede observar que el método de la columna ancha equivalente proporciona muy buena aproximación para distorsiones en muros de mampostería dentro del rango elástico lineal.

7.4.1.5.3 Revisión por Cortante

La fuerza cortante resistida por el muro de mampostería según las NTCM-2004 está dada por la expresión:

$$V_{mR} = F_R(0.5v_m^*A_T + 0.30P) \leq 1.5F_Rv_m^*A_T \quad (7.4)$$

dónde:

F_R = Factor de reduccion de resistencia, para nuestro caso se tomo como 1

P = Carga vertical de compresion sobre el muro

v_m^* = Resistencia a compresion diagonal de la mamposteria

A_T = Area transversal del muro en planta

Anteriormente se obtuvo que $A_T = 3,125\text{cm}^2$, $P = 43.80\text{ ton}$ y tomando en $v_m^* = 3\text{ kg/cm}^2$, se sustituye en la ecuación 7.4 y se tiene que:

$$V_{mR} = 1(0.5 \times 3 \times 3,125 + 0.30 \times 10,000) / 1,000 \leq 1.5 \times 1 \times 3 \times 3,125 / 1,000$$

$$V_{mR} = 7.69\text{ton} < 14.06\text{ ton}$$

Por lo tanto la resistencia a cortante del muro es de 7.69 ton.

7.4.2 CARGA VERTICAL ULTIMA

En cuanto a las losas de transferencia las solicitaciones verticales transmitidas por los muros de carga de los pisos superiores rigen sobre la carga distribuida de servicio que resiste la losa, ya sea carga muerta, viva o cualquier otra carga utilizada en un análisis común.

Los planteamientos convencionales para diseño de losas se basan en cargas uniformemente distribuidas, siendo en la mayor parte de los casos propuestas cuyos resultados se encuentran dentro del rango elástico lineal de comportamiento de la losa.

En algunas ocasiones dichos planteamientos incluyen cargas lineales pero estas se consideran como muros divisorios transmitiendo cargas muy inferiores a las que transmite un muro de carga de un edificio estructurado con losa de transferencia. De hecho en algunos metodos de analisis se limita esa carga, esto con el fin de evitar diseños del lado de la inseguridad.

Por ejemplo uno de los metodos que podria ser utilizado para el calculo de sistemas de piso de transferencia es el de la Teoria de la Linea de Fluencia, sin embargo eso requiere un estudio matemático a fondo, en vista de que debido a la naturaleza de la carga que el muro ejerce sobre la losa se pueden presentar varias situaciones que pueden volver muy complejo el problema.

Uno de esos problemas podria ser el hecho de tener lineas de fluencia inclinadas. Esto puede suceder cuando se tiene un extremo del muro apoyado en algun borde de la losa y el otro extremo en cualquier punto dentro del panel de losa.

Tambien (Kennedy y Goodchild, 2005), presentan una guía de como calcular losas con cargas lineales, ese enfoque aunque interesante, resulta de poca utilidad para nuestro proposito, en vista de que como se muestra en la pagina 65 de tal documento se limita al hecho de que la carga transmitida por el muro a la losa no debe ser mayor al valor de cierto factor.

No obstante se tiene la ventaja de que el modelo ya ha sido desarrolla en elementos finitos en el *capítulo 5* (M2_M2.5_12V), en donde de los resultados obtenidos (Figura 5.5) se puede predecir que la losa podria alcanzar hasta 25 ton aproximadamente de carga vertical ultima transmitida por el muro, sin embargo, al espécimen de prueba no se le aplicara tal carga por el contrario se le aplicara una carga de servicio de entre 6 a 10 toneladas, en dode se espera tener agrietamientos leves por flexion según se observa en la *figura 5.5 del capítulo 5*.

7.4.3 DISEÑO DE LAS TRABES DE APOYO

Este punto es de vital importancia en vista de que durante la ejecución de la prueba, el comportamiento de dichas traves debe pasar desapercibido, es decir que no se deberían observar deflexiones en éstos elementos, agrietamientos u otro tipo de conducta indeseable. Por tal motivo se ha procurado que estos elementos sean lo suficientemente robustos y resistentes para poder eliminar variables, o no linealidades que puedan afectar en forma negativa el experimento.

La *figura 7.5* muestra la posición de las traves de apoyo acarteladas y de las rectangulares dentro del espécimen, las primeras se encuentran perpendiculares al muro, mientras que las rectangulares paralelas.

En los modelos analíticos realizados en *SAP2000* y *ETABS* se ha determinado que las traves acarteladas, por el hecho de encontrarse perpendiculares al muro, reciben más carga al ser solicitadas hasta cuatro veces más que las traves paralelas tanto en corte como en flexión. Lo anterior está bien respaldado, de acuerdo a los coeficientes de momento encontrados en el *capítulo 8*, en donde perpendicularmente al muro tales coeficientes están entre 3 y 4 veces más que los encontrados paralelos al muro.

De los modelos estudiados se determinó que para las traves acarteladas del espécimen, el momento máximo (M_u) incluyendo la acción de la carga lateral y de la carga vertical, es de 19.80 ton-m, mientras que el cortante máximo resulta de 13.50 ton. Con base en los valores mencionados se realizará el diseño de las traves de apoyo.

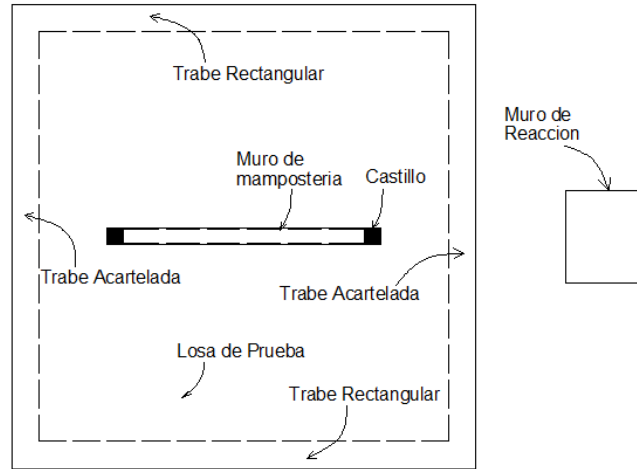


Figura 7.5 Ubicación de las traveses de apoyo en el espécimen de prueba

Se procede a calcular la cuantía de acero en la sección más crítica a flexión de la viga acartelada localizada en la sección central utilizando la siguiente expresión para una viga simplemente reforzada (Gonzales Cuevas y Robles 2009) :

$$M_u = \Phi b d^2 \rho f_y \left(1 - 0.5 \rho \frac{f_y}{f'_c} \right) \quad (7.5)$$

dónde:

M_u = Momento ultimo a flexión de la sección

Φ = Factor de reducción por flexión

b = Ancho de la sección

d = Peralte efectivo de la sección

ρ = Cuantía de acero de flexion de la sección

f'_c = Magnitud del bloque equivalente de esfuerzos del concreto a compresión

La sección crítica a flexión de la trabe acartelada se muestra en la *figura 7.6* (corte B-B) en donde se muestra una sección bruta de 47x25 cm. Por tanto al sustituir valores y despejar ρ de la *ecuación 7.5* se obtiene el siguiente resultado:

$$\rho = \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{2M_u}{\Phi b d^2 f'_c}}}{\frac{f_y}{f'_c}} = \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times 1980000}{0.90 \times 25 \times 43^2 (0.68 \times 250)}}}{\frac{4200}{0.68 \times 250}} = 0.0136$$

De tal forma que el área de acero requerida por flexión es:

$$A_s = \rho b d = 0.0136 \times 25 \times 43 = 14.62 \text{ cm}^2$$

El acero transversal por cortante es diseñado de acuerdo a la propuesta de Tena-Colunga et. al (2008). Con el fin de realizar la revisión por corte se propuso previamente las dimensiones de la trabe las cuales se muestran en la *figura 7.6*, por lo que tenemos que:

$$V_n = V_c + V_s = V_{pc} - \frac{M_{cr}}{d_{cr}} \tan \alpha + V_s \quad (7.6)$$

dónde:

V_n = resistencia nominal en la sección crítica

V_c = contribución del concreto

$$V_{pc} = \left(0.50 \sqrt{f'_c} + 176 \rho_w \frac{d_{cr}}{x_{cr}} \right) b d_{cr}$$

$$V_s = \frac{A_v f_{yv} d_{cr}}{\tan(45 - \alpha)}$$

ρ_w = cuantía de acero

A_v = area de acero transversal

s = espaciamiento del refuerzo transversal

d_{cr} = Profundidad efectiva en la seccion critica de la cartela

$$d_{cr} = d_{min}(1 + 1.35 \tan \alpha)$$

d_{min} = peralte al centro de la viga

x_{cr} = distancia a la que se encuantra el peralte critico

M_{cr} = momento en la seccion critica de la cartela

α = ángulo de acartelamiento

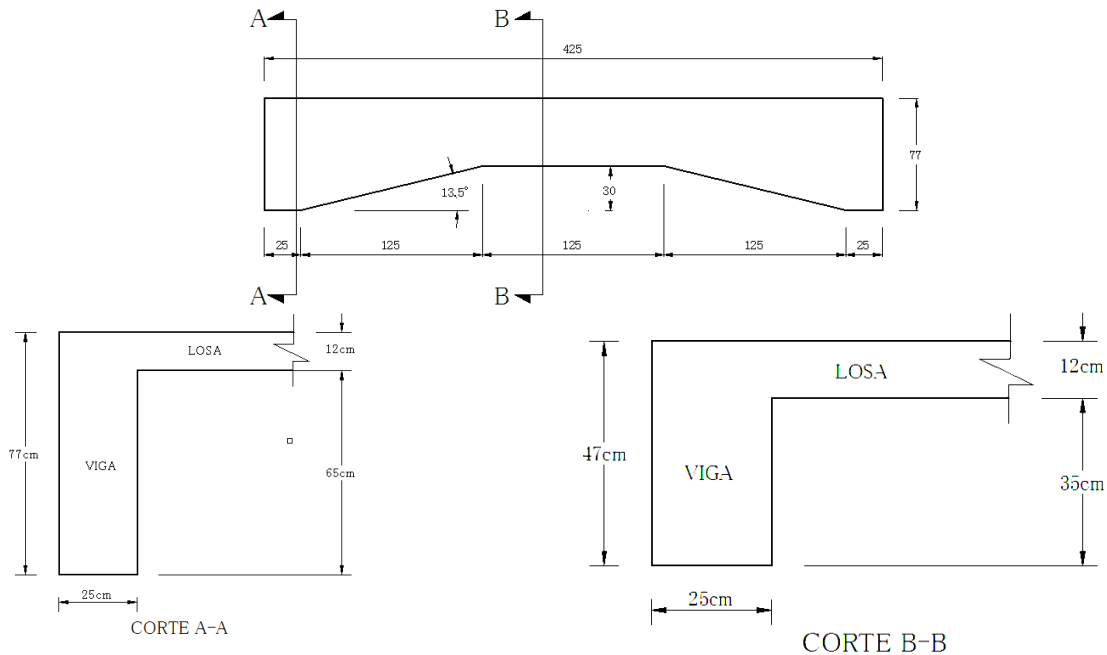


Figura 7.6 Dimensiones de trabe de apoyo acartelada

Tabla 7.4 Datos para el cálculo de las trabes acarteladas

Hmin(cm) =	47.00	f'c (kg/cm2)=	250.00
Hmax(cm)=	77.00	fy (kg/cm2)=	4200.00
r(cm) =	4.00	fyv(kg/cm2) =	4200.00
α =	13.50	b(cm) =	25.00

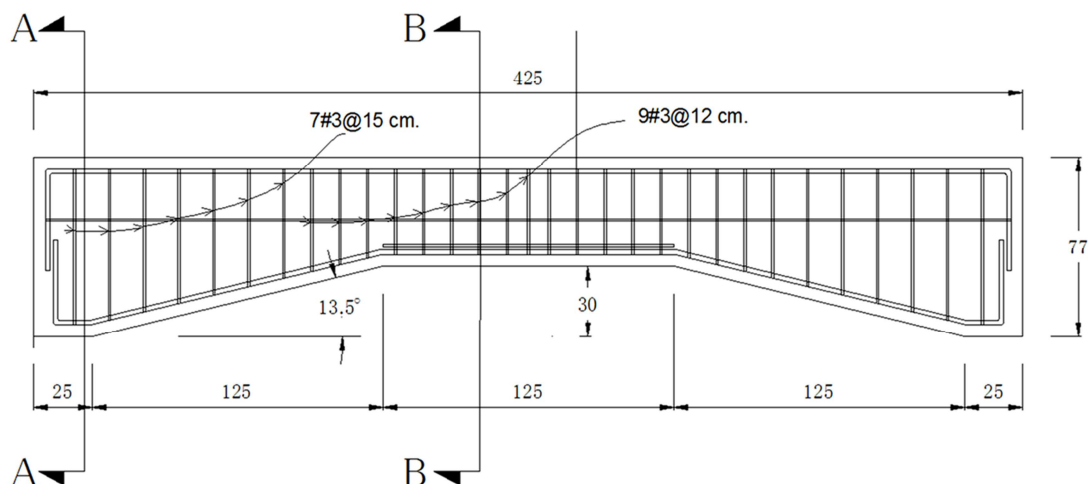
La *tabla 7.4* muestra los datos de entrada necesarios para llevar a cabo el diseño de las trabes acarteladas, después de aplicar la ecuación 7.6 se reflejan los resultados obtenidos en la *tabla 7.5* y en la *ecuación 7.7*.

Tabla 7.5 Resultados obtenidos para el diseño de las trabes acarteladas

dmin(cm) =	43.00	ρ_w =	0.0040
dcr(cm)=	56.94	Vpc(ton) =	12.11
hcr(cm) =	60.94	Mcr (ton.m) =	54.11
y1(cm)=	16.06	Vc (ton) =	9.83
xcr(cm)=	66.91	Vs(ton)=	36.94

$$V_n = V_c + V_s = 9.83 + 36.94 = 46.77 \text{ ton} \quad (7.7)$$

La resistencia última está dada como $V_u = \Phi V_n = 0.75 \times 46.77 = 35.07 \text{ ton}$, por tanto para la separación entre estribos de 15 cm utilizada en los cálculos se afirma que la sección es suficiente para soportar las 13.50 ton de cortante ultimo exigidas por las cargas.



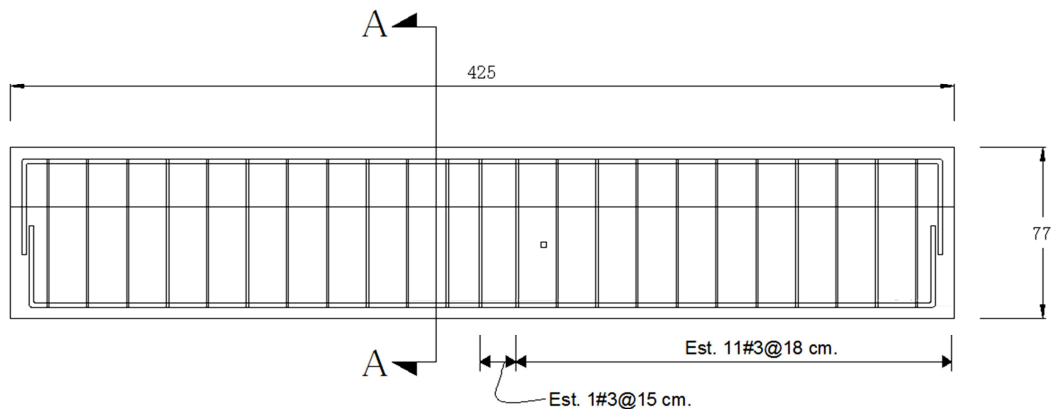


Figura 7.7 Detalles de traves de apoyo

En la *figura 7.7* y *7.8* se muestran los detalles del diseño final de las traves acarteladas y de las rectangulares, en la última se presentan en corte transversal los detalles del armado longitudinal de las traves. La *figura 7.9* muestra los avances en el momento de la redacción de esta tesis del espécimen de prueba que se ha diseñado en el presente capítulo.

A la izquierda en la figura mencionada se observa una de las traves acarteladas que se diseñaron con su respectiva cimbra, mientras que en la figura derecha se aprecia una vista panorámica de los avances en donde se observan las cuatro través de apoyo y se está llevando a cabo del proceso de cimbra, primero de las vigas y luego la cimbra de la losa. Al fondo se observa el marco de reacción que será de utilidad para la aplicación de las cargas laterales.

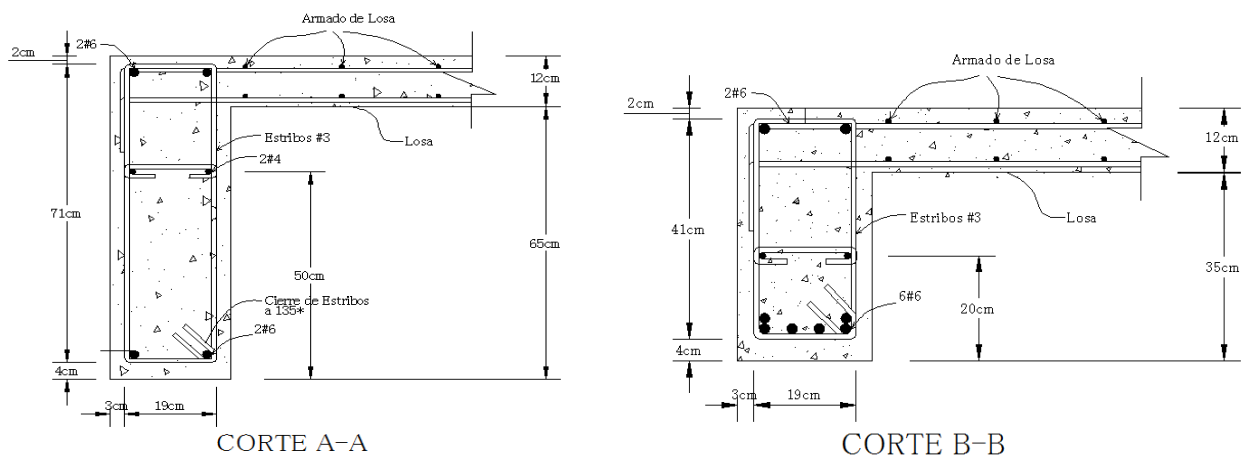


Figura 7.8 Detalles de traves de apoyo en corte



Figura 7.9 Avances en la construcción del espécimen de prueba

7.4.4 DISPOSITIVO DE CARGA VERTICAL

La *figura 7.1* muestra en forma esquemática la disposición de las traves de apoyo para transmitir la carga vertical al espécimen de prueba. Básicamente la carga esta aplicada por cuatro actuadores hidráulicos huecos de 25 ton cada uno dispuestos como se muestra en la *figura 7.1*. A través de cada actuador pasa una barra de “cold rolled” de 1 ¼” de diámetro que a su vez están ancladas a dos traves de apoyo del espécimen. Estas barras tiene la función de transmitir la fuerza de los “gatos hidráulicos” a las dos traves de acero transversales.

Estas traves descargan en otra trabe de acero (*figura 7.10.a*) que va en sentido longitudinal al muro, esto con el fin de distribuir de mejor forma la carga aplicada. Bajo la trabe longitudinal se propone una losa de 10 cm de espesor para simular de alguna forma la losa superior que confina el muro verticalmente. Las barras de “cold rolled” utilizadas para la aplicación de la carga vertical van ancladas a las dos traves rectangulares de apoyo.



a)



b)



c)

Figura 7.10 Parte de los dispositivos ya contruidos para la aplicación de carga vertical a) Trabe longitudinal. B) trabes transversales, c) Dispositivo de anclaje del Cold Rolled

La *figura 7.10.c* muestra uno de los cuatro dispositivos de anclaje para el "cold rolled", tales dispositivos se anclaran en cuatro puntos de las trabes de apoyo horizontales, como lo muestra la *figura 7.1*. Sin embargo en el dispositivo (*figura 7.10.c*) se muestran dos agujeros por cada dispositivo de anclaje eso significa que se utilizaran dos barras de "cold rolled" en cada punto de anclaje.

7.4.5 DISPOSITIVO DE CARGA HORIZONTAL

La aplicación de carga horizontal representa una parte vital del estudio en vista de que a partir de este se pretende determinar el comportamiento de la losa y del muro bajo la acción de cargas laterales, simulando de esta forma las sollicitaciones sísmicas.

Uno de los objetivos es determinar los efectos que las deflexiones de la losa provocan sobre el muro tanto bajo carga lateral como vertical. Por tal motivo se decidió utilizar un sistema de aplicación de carga cíclico creciente y de esta forma poder determinar que magnitud de deflexiones llevan a la falla a la losa o al muro de carga.

La carga lateral será aplicada con un "gato hidráulico" de 25 ton de capacidad de empuje, aunque parezca muy sobrado en empuje dichos dispositivos no poseen la misma capacidad en retracción teniendo en este caso una capacidad al jalar de apenas 11 ton las cuales son suficiente si consideramos una carga máxima lateral menor que ese valor.

En la *figura 7.11* se puede ver en detalle cómo está compuesto el dispositivo de carga lateral y la distancia que se debió cubrir de 141 cm desde el maro de reacción hasta el muro de mampostería. Al igual que con los dispositivos de carga vertical es necesario utilizar celdas de carga para obtener y controlar con mayor precisión la carga lateral aplicada al espécimen.

También en el diseño se proponen dos barras de fijación (*figura 7.11.a*) con un diámetro de $\frac{3}{4}$ " con el fin de uniformizar los desplazamientos laterales del muro.

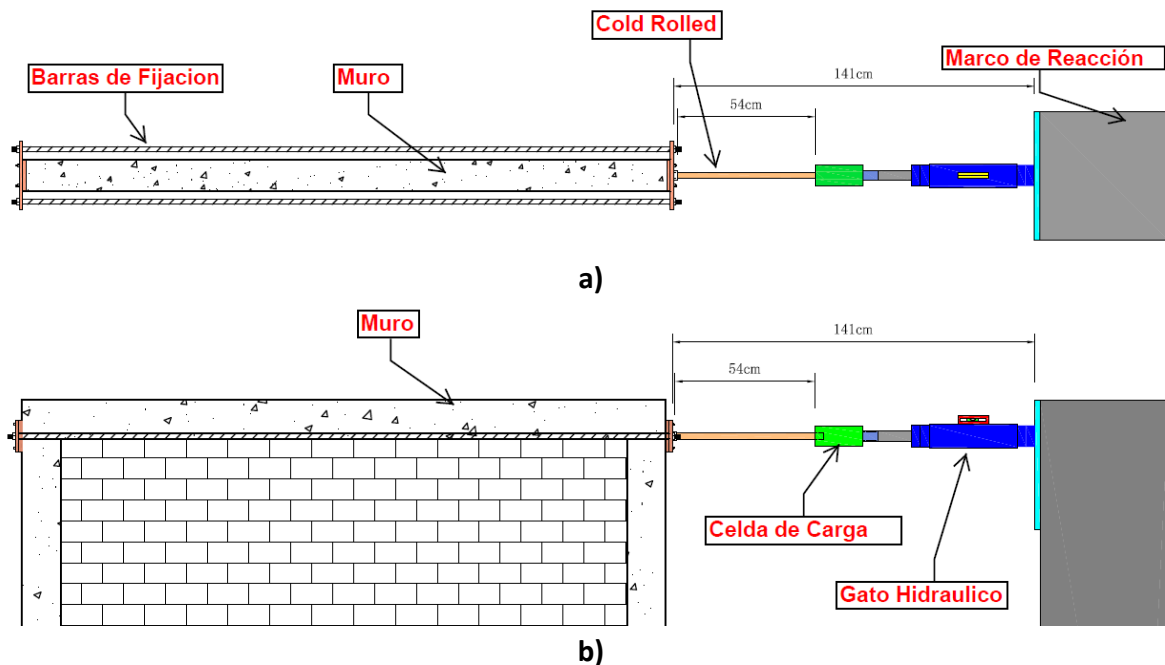


Figura 7.11 Detalle de dispositivo de carga lateral a) Vista superior b) Vista lateral

7.5 INSTRUMENTACIÓN DEL ESPÉCIMEN DE PRUEBA

En esta sección se expone una de los puntos neurálgicos del estudio experimental. Es decir, lo relativo a la instrumentación y adquisición de resultados de la prueba de laboratorio efectuada. En primer lugar, se tiene que definir lo que más interesa obtener de la prueba, de tal suerte que la ubicación de la instrumentación fuese la idónea y que los datos recabados al final de la prueba fuesen de mayor provecho para el propósito.

Entonces, se estableció que del muro se deben medir las distorsiones o deformaciones laterales pero además de ello medir los desplazamientos verticales del mismo elemento. Referente a la losa de prueba, en primer lugar es imperativo obtener las deformaciones en diferentes puntos así como las deformaciones unitarias del acero de refuerzo con el fin de aproximar y conocer el comportamiento de este ante las cargas impuestas.

Por otra parte, y no menos importante, se debe llevar un control y registro fidedigno de las cargas aplicadas al espécimen tanto lateral como horizontalmente, de esta forma se tendría un juego de pares carga-desplazamiento, carga-distorsión, carga-esfuerzo etcétera.

Básicamente, la losa de prueba se instrumentara con “strain gages” y transductores de deformación ubicados estratégicamente para realizar las mediciones de interés. Es importante que los puntos elegidos para instalar dichos dispositivos generen información de modo que se pueda establecer de forma cualitativa y cuantitativa el comportamiento del espécimen es su totalidad.

7.5.1 STRAIN GAGES

La definición de la ubicación de los “strain gages” debe estar orientada a que la información sea de interés, por lo que deben definirse los puntos críticos del espécimen. En ese orden de ideas, se colocaron dichos dispositivos a lo largo del muro de carga y perpendicular a este como muestra la *figura 7.12.a*, además se colocaron en los extremos de la losa de tal forma que se pueda evaluar la influencia de la carga en el momento negativo en los bordes.

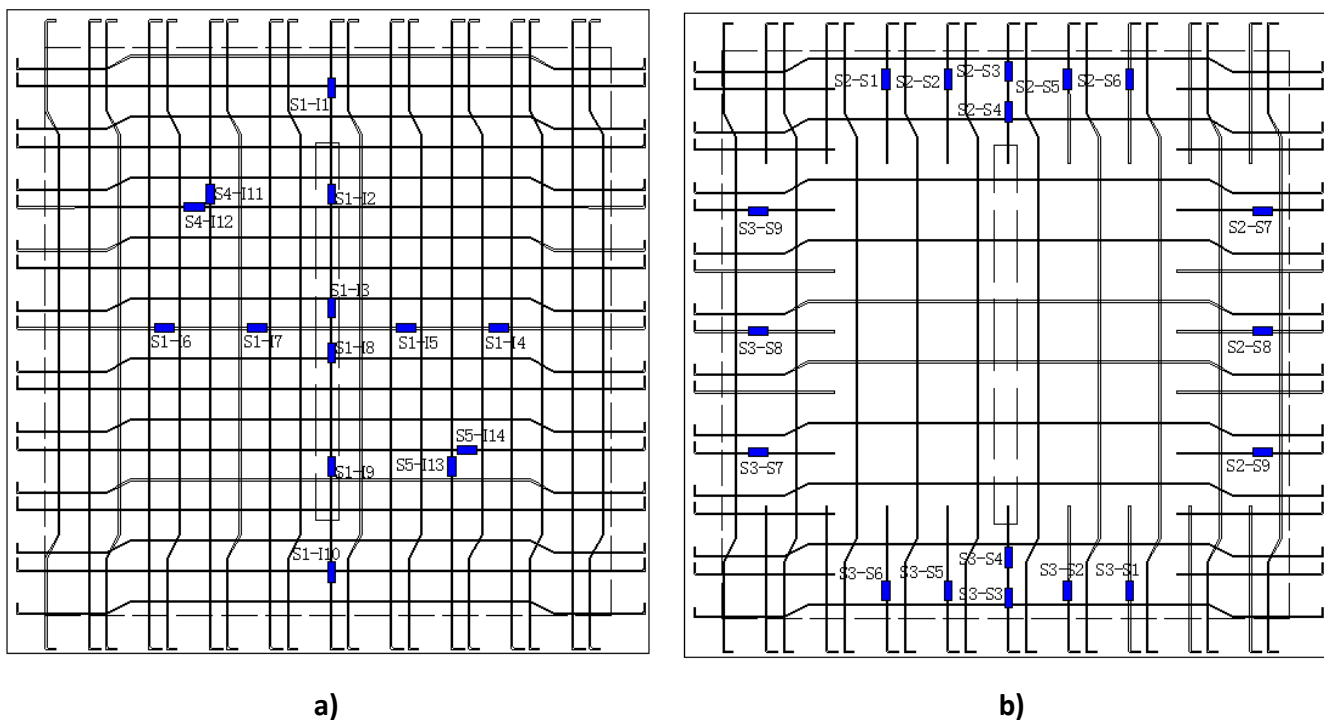


Figura 7.12 Instrumentación losa de prueba a) Lecho inferior b) Lecho superior

También, es importante la evaluación de la deformación del acero de refuerzo y el papel que el anclaje del muro proveído por el acero de refuerzo de los castillos, en el comportamiento del espécimen ante carga lateral. Para ello, también se instrumentan las cuatro barras de refuerzo al pie de ambos castillos, así como los dobleces de las mismas las que generan el anclaje muro – losa, tal como lo muestra la *figura 7.13*.

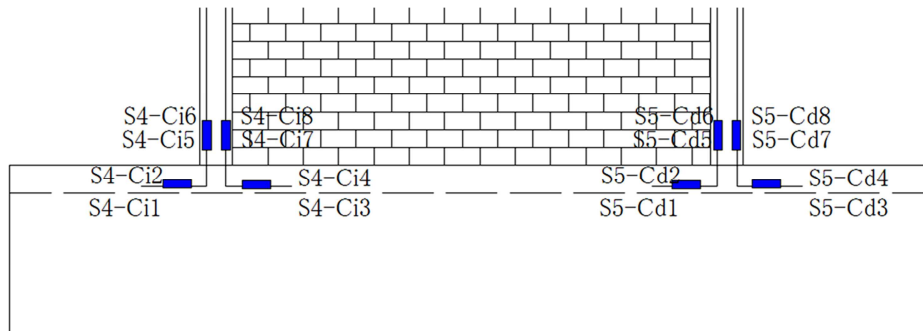


Figura 7.13 Instrumentación con strain gages de los castillos y su anclaje

7.5.1 MICRÓMETROS

Los micrómetros para medir en forma directa los desplazamientos ocurridos durante la prueba, se ubican estratégicamente para medir dos aspectos importantes. El primero inherente directamente a la prueba es la medición de los desplazamientos en la losa de prueba y en el muro de carga sean estos horizontales o verticales. El segundo son mediciones más bien de control es decir para cuantificar movimientos y rotaciones no deseadas del espécimen.

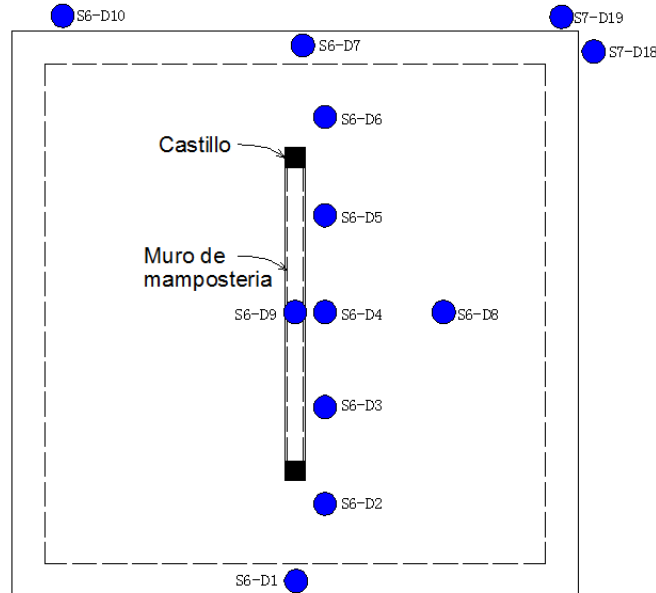


Figura 7.14 Micrómetros en losa y traveses de apoyo

Para este segundo punto se colocan 5 micrómetros (ver *figura 7.14*). Los micrómetros S6-D1 y S6-D7 se colocan por debajo de las traveses acarteladas a la mitad del claro para medir desplazamientos verticales. Los micrómetros S6-D10 y S7-D19 están pensados para medir

desplazamientos horizontales del espécimen controlando de esta forma el deslizamiento que podría experimentar el espécimen a causa de la carga lateral. Se encuentran por debajo de la losa únicamente los micrómetros SD-9 y SD-8.

Finalmente el micrómetro S7-D18 sirve para monitorear las rotaciones en el espécimen. Cabe mencionar que durante la prueba y según el diseño del espécimen de prueba los desplazamientos observados en estos micrómetros de prueba teóricamente deben de ser cero.

La *figura 7.15* muestra la ubicación de los micrómetros en el muro para la medición de desplazamientos laterales y verticales.

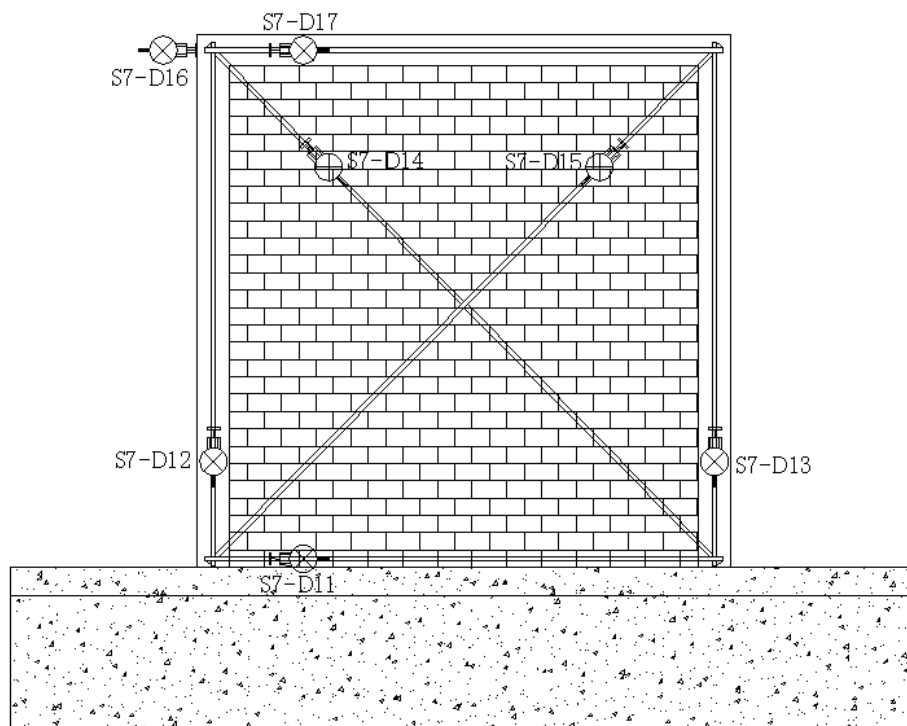


Figura 7.15 Micrómetros en muro de carga

En el laboratorio se cuenta para la adquisición de datos con dos cajas de conexiones una de 50 canales y otra de 30 canales, y cada tipo de conexión consta de diez canales, estos tipos de conexión pueden ser strain gages, micrómetro o celdas de carga, por tal motivo se ordenaron las salidas de acuerdo a su ubicación y tipo según se observa en la *tabla 7.6*.

Tabla 7.6 Identificación de los canales de instrumentación

STRAIN GAGES					MICRÓMETROS		CELDA DE CARGA
Salida 1	Salida 2	Salida 3	Salida 4	Salida 5	Salida 6	Salida 7	Salida 8
S1-I1	S2-S1	S3-S1	S4-Ci2	S5-Cd1	S6-D1	S6-D11	CC-1
S1-I2	S2-S2	S3-S2	S4-Ci3	S5-Cd2	S6-D2	S6-D12	CC-2
S1-I3	S2-S3	S3-S3	S4-Ci4	S5-Cd3	S6-D3	S6-D13	CC-3
S1-I4	S2-S4	S3-S4	S4-Ci5	S5-Cd4	S6-D4	S6-D14	CC-4
S1-I5	S2-S5	S3-S5	S4-Ci6	S5-Cd5	S6-D5	S6-D15	CC-5
S1-I6	S2-S6	S3-S6	S4-Ci7	S5-Cd6	S6-D6	S6-D16	
S1-I7	S2-S7	S3-S7	S4-Ci8	S5-Cd7	S6-D7	S6-D17	
S1-I8	S2-S8	S3-S8	S4-Ci9	S5-Cd8	S6-D8	S6-D18	
S1-I9	S2-S9	S3-S9	S4-I11	S5-I13	S6-D9	S6-D19	
S1-I10			S4-I12	S5-I14	S6-D10		

7.6 PROTOCOLO DE CARGA

Se propone para la prueba del espécimen un protocolo de carga lateral controlado por distorsiones laterales, dicho esquema de carga consta de 6 ciclos de carga repetidos, iniciando el primer ciclo con una distorsión lateral de 0.0005 y terminando el último ciclo con 0.006. Sin embargo se debe mencionar que antes de la aplicación de la carga lateral ya se deberá haber aplicado la carga vertical de servicio al muro de entre 6 a 10 ton. La *figura 7.16* ilustra el protocolo y las distorsiones máximas para cada ciclo.



Figura 7.16 Protocolo de Carga Lateral

7.7 DISCUSIÓN

El proyecto experimental que se está llevando a cabo en el laboratorio de estructuras de la UAM-Azcapotzalco y discutido en este capítulo, nos dará información valiosa acerca del comportamiento de los sistemas muro-losa ante carga lateral y vertical. Es obvio que en este tipo de proyectos se debe tener un estricto control sobre todas las variables involucradas como la resistencia de los materiales, técnicas de construcción, magnitud de las cargas aplicadas, registro de daño presentado en el espécimen entre otros, de tal forma que con un buen control de dichas variables se puedan eliminar incertidumbre que podrían afectar los resultados finales.

Además el diseño presentado en el presente capítulo debe irse revisando de acuerdo a los cambios que se den en el proyecto experimental en la medida en que este se vaya desarrollando.

Un aspecto muy importante que se medirá en el momento de la prueba del espécimen es el aspecto del anclaje muro-losa especialmente ante carga lateral, el cual no se realizó en los modelos analíticos de elementos finitos.

CAPITULO 8

Coeficientes de momento para losa cuadrada con muro de carga al centro del claro

8.1 INTRODUCCIÓN

Uno de los aspectos que se derivan de esta investigación es la estimación de los coeficientes de momentos para el diseño de losas, cuando éstas poseen un muro de carga simétricamente colocado al centro.

Este tópico es de gran interés es determinar cómo se distribuye la carga del muro en la losa, y a su vez a las vigas de apoyo.

Por tal motivo, se procedió a obtener dichos coeficiente para los modelos que se estudiaron en esta tesis únicamente bajo carga vertical. Queda para estudios futuros, otras posiciones del muro en la losa, así como para diferentes relaciones de aspecto de la misma.

8.2 PUNTOS ANALIZADOS

La *figura 8.1* muestra los puntos dentro de la losa que se analizaron. En los puntos 1 y 2 se obtienen coeficientes para momento negativo, mientras que los puntos 3Y y 3X son para determinar coeficientes de momento positivo.

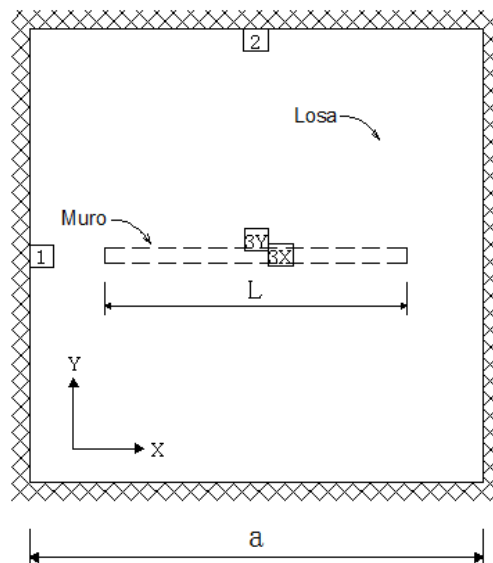


Figura 8.1 Puntos fijados para la obtención de los coeficientes de momento

8.3 INTEGRAL DE MOMENTO

Una vez elaborado el modelo en el programa de elementos finitos se puede determinar el momento en cualquier punto dentro de la estructura. Sin embargo, es de interés solo calcularlo en ciertos puntos, como los que se muestran en la *figura 8.1*.

Para ello, es necesario hacer uso de la *ecuación 8.1*, donde a través de los resultados de esfuerzos del modelo, se construyen varias funciones de esfuerzos, teniendo como variable independiente la altura o espesor del elemento.

$$M_y = -b \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x(z) z \, dz \quad (8.1)$$

En el caso de contar con varias capas de elementos se debe determinar el esfuerzo en cada nodo a lo largo del espesor de la losa y construir una función de esfuerzos en cada tramo para luego realizar una sumatoria de todas la integrales dando como resultado el momento por unidad de longitud en el punto deseado.

Por lo tanto para tal caso la *ecuación 8.1* se podría expresar en forma general como:

$$M_y = -b \left[\int_{h_1}^{h_2} (\sigma_x(z))_1 z \, dz + \int_{h_2}^{h_3} (\sigma_x(z))_2 z \, dz + \dots + \int_{h_n}^{h_{n+1}} (\sigma_x(z))_n z \, dz \right] \quad (8.2)$$

En donde:

M_y = momento con respecto al eje y

b = ancho del elemento estructural

$(\sigma_x(z))_i$ = función de esfuerzos en x de cada tramo entre nodos

h = diferencia en la distancia entre nodos consecutivos del tramo

$h_n - h_1$ = espesor de la losa

En la *ecuación 8.2* la nomenclatura de los ejes cartesianos x, y, z se encuentra conforme a su posición en el programa de elementos finitos utilizado.

Respecto a la constante b se tomó como la unidad en vista que se requiere de un momento por unidad de longitud.

8.4 COEFICIENTES DE MOMENTOS

En el programa de elementos finitos se tiene acceso al estado de esfuerzos final de en cada nodo o elemento. Sin embargo, para obtener los coeficientes de momentos se procuró que el modelo en general estuviera en el intervalo lineal en vista de que se realizaron algunas pruebas para obtener los coeficientes en estados de carga a los cuales el modelo presentara cierto agrietamiento dando resultado poco satisfactorios.

Por tanto, el análisis se realizó a un estado de carga al cual ningún elemento se había agrietado es decir que el sistema en general se encuentra dentro del rango elástico lineal.

Para efectos de ilustrar el procedimiento se escogió el modelo M3_C3_12V para determinar su momento en el punto 1 según la *figura 8.1*.

Las tablas 8.1 a 8.5 muestran los datos relevantes para obtener los coeficientes. Se presentan los nodos requeridos y sus respectivos esfuerzos ya sea en el eje X o Y según la convención de ejes coordenados utilizados mostrados en la *figura 8.1*.

Los valores tabulados de esfuerzos se grafican contra su correspondiente distancia dentro del espesor de la losa como se puede ver en la *figura 8.2* para el punto 1 del modelo M3_C3_12V.

A continuación se obtienen las ecuaciones lineales de esfuerzo entre cada nodo, las cuales son función de la altura de cada nodo dentro del espesor de la losa.

Utilizando la *ecuación 8.2* y haciendo $b = 1$, se resuelve la integral como se muestra en la *ecuación 8.3*.

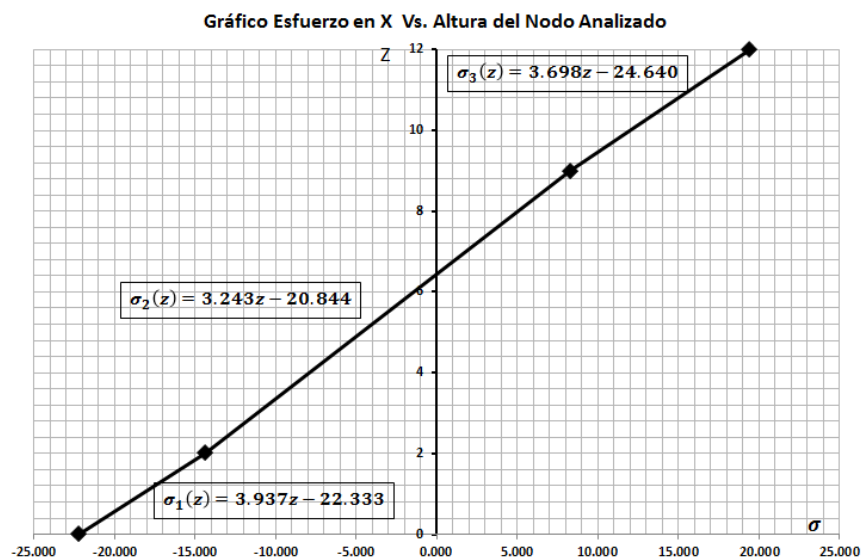


Figura 8.2 Ecuaciones de esfuerzos punto 1, modelo M3_C3_12V

$$M_y = \left[\int_0^2 (3.937z - 22.333)z \, dz + \int_2^9 (3.243z - 20.844)z \, dz + \int_9^{12} (3.698z - 24.640)z \, dz \right] = 397.993 \, \text{kg} \cdot \frac{\text{cm}}{\text{cm}} \quad (8.3)$$

Una vez obtenido el momento por unidad de longitud en el punto, se determina la carga distribuida equivalente actuando sobre la losa. Se le llama equivalente porque la carga real actúa a lo largo del área superior del muro, de esta forma se divide la carga aplicada al muro entre el área total de la losa o panel sobre la cual actúa.

Para el modelo M3_C3_12V se tiene que la carga equivalente según la *tabla 8.4* es 365.86 kg/m². Por lo tanto según las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto NTCC-2004 los coeficientes de momento están dados por la *ecuación 8.4*:

$$\alpha = \frac{M}{10^{-4} w a^2} \quad (8.4)$$

Dónde:

α = *coeficiente de momento, adimensional*

M = *momento por unidad de longitud*

w = *carga por unidad de área sobre la losa*

a = *longitud del lado corto de la losa*

De esta forma sustituyendo el resultado obtenido en la *ecuación 8.3*, la carga equivalente utilizada y la longitud del claro de la losa se tiene que:

$$\alpha = \frac{229.05 \, \text{kg} \cdot \text{cm}/\text{cm}}{10^{-4} (365.86 \, \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}) (3.75 \text{m})^2} = 445.19 \quad (8.5)$$

El resultado obtenido en la *ecuación 8.5* representa el coeficiente para momento negativo en el punto 1 según muestra la *figura 8.1*, para una relación $a/L = 1.25$.

De manera similar se determinan los demás coeficientes con los datos mostrados en las tablas 8.1 a 8.5 para los modelos analizados.

Tabla 8.1 Esfuerzos y momentos para modelo LCU_12

Puntos de Obtencion de Coeficientes									
Momento Negativo					Momento Negativo				
1					2				
h(cm)	Nodo	Esfuerzo (x)	Nodo	Esfuerzo (Y)	Nodo	Esfuerzo (y)	Nodo	Esfuerzo (x)	M1(kg.cm/cm)=
12	1557	65.631	1482	36.586	583	65.796	929	41.586	1195.64
9	1558	31.226	1484	17.464	584	31.646	930	19.927	1276.83
2	1559	-42.446	1486	-24.001	589	-41.747	931	-26.558	M3(kg.cm/cm)= 510.76
0	1560	-66.249	1488	-37.045	592	-65.531	934	-41.620	M4(kg.cm/cm)= 450.72
Momento Positivo					Momento Positivo				
3Y					3X				
h(cm)	Nodo	Esfuerzo (x)	Nodo	Esfuerzo (Y)	Nodo	Esfuerzo (y)	Nodo	Esfuerzo (x)	Carga Eq. (kg/m²) = 2500.00
12	869	-30.666	681	-11.669	869	-30.185	1213	-9.440	a (cm) = 3.75
9	870	-15.457	683	-5.697	870	-15.171	1214	-4.620	
2	871	19.897	686	7.899	871	19.727	1217	9.433	
0	872	30.027	688	11.837	872	29.739	1219	14.252	

Tabla 8.2 Esfuerzos y momentos para modelo M1_C2.5_12V, a/L=1.50

Puntos de Obtencion de Coeficientes									
Momento Negativo					Momento Negativo				
1					2				
h(cm)	Nodo	Esfuerzo (x)	Nodo	Esfuerzo (x)	Nodo	Esfuerzo (y)	Nodo	Esfuerzo (y)	M1(kg.cm/cm)= 378.58
12	2761	28.058	2828	6.377	2196	7.365	2604	4.815	M2(kg.cm/cm)= 162.20
9	2776	13.036	2836	3.057	2224	3.635	2624	2.333	M3Y(kg.cm/cm)= 140.74
2	2799	-20.092	2845	-4.350	2270	-4.604	2660	-3.114	M3X(kg.cm/cm)= 7.24
0	2810	-30.701	2848	-6.612	2292	-7.179	2667	-4.799	Carga Eq. (kg/m²) = 432.21
Momento Positivo					Momento Positivo				
3Y					3X				
h(cm)	Nodo	Esfuerzo (y)	Nodo	Esfuerzo (x)					
12	1318	-6.223	1318	-0.798					
9	1364	-2.831	1364	-0.048					
2	1477	3.521	1477	1.287					
0	1497	5.201	1497	1.639					

Tabla 8.3 Esfuerzos y momentos para modelo M2_M2.5_12V, a/L=1.50

Puntos de Obtencion de coeficientes									
Momento Negativo					Momento Positivo				
1					2				
h(cm)	Nodo	Esfuerzo (x)	Nodo	Esfuerzo (x)	Nodo	Esfuerzo (y)	Nodo	Esfuerzo (y)	M1(kg.cm/cm)=
12	2761	24.555	2828	5.862	2196	7.121	2604	4.565	346.07
9	2776	11.571	2836	2.836	2224	3.498	2624	2.214	M2(kg.cm/cm)= 139.68
2	2799	-16.726	2845	-3.915	2270	-4.516	2660	-2.966	M3Y(kg.cm/cm)= 153.61
0	2810	-25.755	2848	-5.973	2292	-7.021	2667	-4.566	M3X(kg.cm/cm)= 22.21
									Carga Eq. (kg/m ²) = 366.73
									a (cm) = 3.75
Momento Positivo									
3Y					3X				
h(cm)	Nodo	Esfuerzo (y)	Nodo	Esfuerzo (x)					
12	1318	-6.240	1318	-1.395					
9	1364	-3.073	1364	-0.576					
2	1477	3.837	1477	1.311					
0	1497	5.779	1497	1.835					

Tabla 8.4 Esfuerzos y momentos para modelo M3_C3_12V, a/L=1.25

Puntos de Obtencion de coeficientes									
Momento Negativo					Momento Positivo				
1					2				
h(cm)	Nodo	Esfuerzo (x)	Nodo	Esfuerzo (Y)	Nodo	Esfuerzo (y)	Nodo	Esfuerzo (x)	M1(kg.cm/cm)=
12	2331	19.434	2413	2.647	1767	2.907	2055	2.074	229.05
9	2347	8.339	2419	1.264	1787	1.433	2076	1.014	M2(kg.cm/cm)= 60.44
2	2375	-14.359	2436	-1.829	1815	-1.813	2118	-1.325	M3Y(kg.cm/cm)= 15.77
0	2385	-22.233	2443	-2.770	1824	-2.823	2137	-2.047	M3X(kg.cm/cm)= 10.81
									Carga Eq. (kg/m ²) = 365.86
									a (cm) = 3.75
Momento Positivo									
3Y					3X				
h(cm)	Nodo	Esfuerzo (y)	Nodo	Esfuerzo (x)					
12	1213	-1.049	1213	-0.069					
9	1247	-0.927	1247	0.034					
2	1341	1.415	1341	0.613					
0	1355	2.077	1355	0.768					

Tabla 8.5 Esfuerzos y momentos para modelo M4_M3_12V, a/L=1.25

Puntos de Obtencion de coeficientes										
Momento Negativo					Momento Positivo					
	1		2		3Y		3X		M1(kg.cm/cm)=	260.21
h(cm)	Nodo	Esfuerzo (x)	Nodo	Esfuerzo (Y)	Nodo	Esfuerzo (y)	Nodo	Esfuerzo (x)	M2(kg.cm/cm)=	76.59
12	2331	20.631	2413	3.159	1767	3.765	2055	2.615	M3Y(kg.cm/cm)=	79.04
9	2347	9.256	2419	1.527	1787	1.844	2076	1.276	M3X(kg.cm/cm)=	14.23
2	2375	-14.144	2436	-2.127	1815	-2.389	2118	-1.686	Carga Eq. (kg/m²) =	365.86
0	2385	-22.154	2443	-3.237	1824	-3.709	2137	-2.601	a (cm) =	3.75

Momento Positivo				
	3Y		3X	
h(cm)	Nodo	Esfuerzo (y)	Nodo	Esfuerzo (x)
12	1213	-3.155	1213	-0.933
9	1247	-1.724	1247	-0.408
2	1341	2.233	1341	0.961
0	1355	3.385	1355	1.357

En la tabla 8.6 se resumen los resultados de los coeficientes de momento para los demás modelos, incluyendo el de losa uniformemente cargada y su respectiva comparación con los coeficientes propuestos por las NTCC-2004.

Se debe señalar el hecho de que los coeficientes de momento obtenidos en este capítulo son producto de la carga ejercida en la losa a través del muro, no se considera otra carga sobre la losa.

Tabla 8.6 Coeficientes de Momento

Coeficiente de Momento				
MODELO	Momento Negativo		Momento Positivo	
	Punto 1	Punto 2	Punto 3Y	Punto 3x
NTC-C	330	330	500	500
LCU_12	340	363	145	128
M1_C2.5_12V	623	267	232	12
M2_M2.5_12V	671	271	298	43
M3_C3_12V	445	117	31	21
M4_M4_12V	506	149	154	28

Es importante mencionar que los coeficientes obtenidos se encuentran promediados de acuerdo a los momentos máximo que se da al centro de la franja central con el que se da al extremo de la misma, de lo contrario se obtendrían coeficientes muy altos lo que significaría en momentos elevadísimos que tendrían como consecuencia cuantiosos arreglos de acero a lo largo de la franja central.

8.5 DISCUSIÓN

En la *tabla 8.6* se observa gran similitud entre los coeficientes para momento negativo del modelo *LCU_12* y con que proponen las NTCC-2004, no así, para los coeficientes de momentos positivo.

Los coeficientes para momento negativo obtenidos para los modelos losa-muro, demuestran que se debe ser muy prudente cuando se diseña la losa. Como se observa en la *tabla 8.6*, el muro genera coeficientes altos específicamente en el borde perpendicular a este. De igual manera, también se generan momentos, aunque no tan grandes, pero sí de consideración en el borde paralelo y al centro del claro.

También, se debe señalar que los coeficientes obtenidos en la *tabla 8.6* para los modelos muro-losa habría que adicionarle el efecto de la carga distribuida propia de la losa, en vista de que en el análisis la única carga que se tomó en cuenta la carga que transmite el muro.

Por tanto, es un error de diseño despreciar el efecto en los momentos de los bordes y el centro de la losa, producido por el muro de carga.

Queda abierta la investigación para determinar si en el caso de tener la losa y el muro cargados al mismo tiempo los coeficientes en cada caso por separado pueden ser superpuestos o si por el contrario se debe realizar el análisis completo teniendo la losa y el muro cargados.

CAPITULO 9

Conclusiones

El estudio de Observancia del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias realizado por académicos de alto prestigio en la Ciudad de México fue uno de los factores principales que motivó la realización de la presente tesis.

En ese proyecto no se estudian las losas de transferencia sino más bien se presenta la problemática del aumento de la construcción de edificios estructurados con losa de transferencia especialmente en zonas de alto riesgo sísmico como son algunas áreas de la Ciudad de México.

Para iniciar los trabajos relacionados con esta tesis se debió buscar y recolectar la mayor cantidad de información relacionada con este tipo de estructuración. Sin embargo, se encontró poca o nula literatura relacionada directamente con el tema, ya sea analítica o experimental. Debido a lo anterior, es muy probable que los despachos de cálculo en la práctica diseñen este tipo de estructuras bajo una gran diversidad de criterios que pueden o no estar sustentados técnicamente.

Lo anterior indica que es muy probable que en la actualidad estos sistemas se estén diseñando como dos estructuras diferentes, una formada por los marcos resistentes a momento de los sótanos, y la otra por la estructura a base de muros sobre la losa de transferencia, o simplemente se está ignorando la interacción de la losa con el resto del edificio. Ambas situaciones pueden llevar a consecuencias indeseables en el desempeño del edificio tanto ante cargas de servicio como ante sollicitaciones sísmicas como lo muestran los resultados obtenidos de los análisis del capítulo 2.

Los capítulos 2 y 3 han sido de gran importancia ya que se demostró la gran influencia que ejerce el piso de transferencia sobre el resto del edificio. Es importante mencionar que en los modelos analizados sobre base rígida, y para la cantidad de niveles que se tomaron en cuenta, debe ser muy mal concebido el diseño para que los cortantes sean superados ante carga lateral, ya que prácticamente el 100% de los muros sobre base rígida analizados pasaron por cortante.

En un diseño convencional no se espera que el muro experimente cortantes elevados ante carga vertical únicamente, por ejemplo del análisis paramétrico del capítulo 2, si tomamos el muro M1 como referencia, se encuentra que en el 60% de los casos su capacidad a cortante se ve excedida solamente ante carga vertical y el valor se eleva a 83% cuando se analizan con carga lateral.

Los resultados de los *capítulos 2 y 3* son muy inquietantes y al mismo tiempo son interesantes, debido a que solo por carga vertical el muro utiliza toda o la mayoría de su capacidad a corte dejando muy poco o nada para resistir cargas laterales.

Sin embargo, los altos valores de cortante presentados en los muros pueden ser aunque no en su totalidad, en cierto porcentaje, disminuidos, modificando algunos parámetros como por ejemplo, aumentar el espesor de la losa, darle continuidad a una mayor cantidad de muros hasta la base del edificio, el disminuir la longitud de los claros de tal forma de aumentar la rigidez a flexión de la losa o también limitar el número de niveles sobre la losa de transferencia por mencionar algunos.

Por lo tanto, se concluye que ignorar la interacción muro-losa en el diseño de un edificio de losa de transferencia puede ser un grave error, afectando la estructura incluso en condiciones de servicio y siendo crítico en situaciones sísmicas.

No obstante, hay otro tema que es el efecto del anclaje losa-muro ante cargas laterales, aunque este no se analizó en el presente trabajo, consideramos que es de vital importancia para futuros estudios, debido a que los muros se desplantan directamente sobre la losa y no sobre una cimentación común, por lo que un mal anclaje entre la losa y el muro podría generar desprendimientos entre ambos sistemas u otro tipo de consecuencias negativas ante cargas sísmicas.

En los *capítulos 4, 5 y 6*, se realizó un análisis detallado a nivel local de un sistema muro-losa de los cuales se obtuvieron resultados muy interesantes.

En el *capítulo 5* se llevó a la losa a su capacidad límite a través de una carga considerable transmitida a través del muro. Se observó que el hecho de tener un muro cargando directamente a la losa, limita la capacidad de deformación y la carga última de la propia losa, tal y como se muestra en la comparación hecha entre los modelos muro-losa y el modelo de una losa cargada uniformemente, donde este último supera por mucho en lo referente a las dos variables mencionadas.

De acuerdo a las curvas de capacidad de los modelos (excepto los modelos con muros de 3.75 m de longitud), presentan tres fases en su comportamiento, inicialmente se observa el rango elástico lineal hasta cierta carga, después de lo cual el sistema pierde rigidez y la pendiente de la curva cae, sigue con esa misma pendiente hasta llegar a la tercera fase que es la etapa final en donde cae la rigidez del sistema producto de la falla simultánea en varios puntos de la losa por debajo del muro de carga.

Los modelos con longitudes de muro de 3.75 m que abarcan todo el claro de la losa, muestran un comportamiento singular en vista de que la mayor parte de la carga lateral aplicada al muro es transferida hacia los extremos del mismo, transmitiendo en un menor porcentaje dicha carga a la losa por tal motivo esta sufre agrietamientos mínimos como los muestra las figuras de agrietamientos de losa en el *capítulo 5*.

Se determinaron patrones de agrietamiento en la losa para los modelos realizados. Se ve claramente el efecto del punzonamiento del muro en la losa a través de líneas de grietas bien definidas paralelas al muro y a cierta distancia del mismo. Por otra parte, en los estados finales de carga se experimentan aplastamientos del concreto en los extremos del muro así como en el área superior de la losa cercana a dicha región. Además, se presentan agrietamientos excesivos por flexión bien localizados en la cara inferior de la losa justamente debajo de los extremos del muro, dichas grietas se extienden hasta los bordes de la losa generando un patrón de grietas bien definido.

Con los modelos *M7_C3_13V* y *M8_M3_13V*, a través de sus curvas de capacidad, se demostró la influencia favorable en capacidad de carga y deformación vertical al aumentar un centímetro el espesor de la losa. Relacionado con el comportamiento del sistema de acuerdo con el material que conforma el muro (concreto o mampostería), los modelos con muro de concreto son superiores en capacidad de carga pero inferiores en la cantidad de deformación que el sistema puede tolerar.

El desempeño de los muros ante carga vertical en losas de transferencia, se puede considerar como bueno, sin embargo se deben hacer algunas acotaciones al respecto específicamente de los muros de mampostería. Se observó que al final de la carga última los muros de mampostería habían sufrido cierto agrietamiento aunque no severo, esto se le atribuye a la sobrecarga que se le impuso lo que provoco que los castillos del mismo tendieran a abrirse hacia los lados generando cortantes a lo largo de la altura del muro agrietándolo.

Ese problema se resuelve controlando en el diseño la cantidad de carga axial que se le impondrá al muro, así como también utilizando materiales de buena resistencia y diseñando adecuadamente el confinamiento de los muros.

También, se puede presentar otra condición que no se estudió en el capítulo 5, pero si de alguna forma en los capítulos 2 y 3, y es la situación cuando se tiene un muro en donde uno de los extremos se encuentra apoyado en el borde del panel de losa y el otro extremo en cualquier punto dentro de la losa, tal condición como se vio en los capítulos 2 y 3 provoca cortantes

elevados ante carga vertical y aún mayores ante carga lateral, además de distorsiones iniciales sin siquiera haber aplicado carga lateral alguna.

En el *capítulo 6*, a los mismos modelos analizados ante carga vertical en el *capítulo 5*, se les aplicó en forma creciente y en un solo sentido una carga lateral hasta alcanzar la condición de falla.

Se estableció que existe una gran diferencia en el comportamiento y en los valores máximos de los modelos con muro de concreto y los de mampostería, siendo los primeros superiores en capacidad ante carga lateral y conservando una mayor rigidez inicial. También, la tendencia es que los modelos de losa-muro de mampostería pueden deformarse lateralmente más que los de concreto. Sin embargo este aspecto no se puede afirmar con entera propiedad en vista de que por aspectos de convergencia no se determinó la deformación última del sistema.

Se pudo determinar que en el caso de tener muros de mampostería sobre la losa, quien determina la capacidad lateral del sistema es el propio muro y no la losa. Mientras que en cambio cuando se tienen muros de concreto sobre la losa, es ésta quien limita la capacidad del sistema a deformarse lateralmente. Este aspecto es de suma importancia, en el primer caso debido a la rigidez a flexión de la losa y también al hecho de que el muro está construido con mampostería, un material muy inferior en resistencia que el concreto, no es capaz de “punzonar” la losa con su puntal de compresión, por tal motivo este debe absorber un gran porcentaje del cortante producido por la carga lateral.

Por otra parte, cuando el muro es de concreto se detectó que se da un fenómeno interesante en el comportamiento a carga lateral del sistema, debido a la gran rigidez inicial del muro, al aplicar la carga lateral el muro tiende a rotar como cuerpo rígido creando zonas de esfuerzos muy elevados especialmente en la esquina en compresión del muro, esto genera graves aplastamientos y agrietamientos en el concreto de la losa aledaño a dicha zona mientras que el muro de concreto sigue prácticamente sin sufrir daño alguno, por tal motivo la capacidad ante carga lateral está determinada por la resistencia de la losa.

Comparando los modelos de losa-muro con los de muro sobre base rígida que se realizaron en el capítulo 6, se demostró una gran diferencia en el comportamiento de ambos sistemas ante carga lateral tal como muestran las gráficas comparativas.

Por tanto, en el diseño de un piso de transferencia se deben considerar que los muros del primer nivel por el hecho de estar sobre una base flexible sufren reducciones significativas en la rigidez inicial como se demostró en la *sección 6.8*, también la capacidad de deformación y de

resistencia a corte como se determinó en las gráficas que comparan los sistemas muro-losa con los de base rígida.

De acuerdo a lo anterior y al menos para edificios con pisos de transferencia a base de losas perimetralmente apoyadas se recomienda que se diseñen para ductilidades muy bajas de entre $Q=1$ a $Q=1.5$, no importando si los muros son de concreto, mampostería o una combinación de ambos.

Se logró establecer estados límites de daño para los modelos muro-losa a través de una fórmula de normalización empírica propuesta. Contrario a lo que se acostumbra para muros en donde los niveles de daño se determinan conforme a la distorsión lateral observada en el muro, en el caso de los sistemas muro-losa eso resulta muy difícil en vista de las grandes diferencias entre el comportamiento de uno y otro sistema.

Entonces, se determinó proponer estados límites en base en un factor de normalización, con esto resulto más fácil y preciso determinar los estados límites para cada uno de los modelos, naturalmente los estados límites los sistemas con muro de mampostería difieren de los de concreto.

En esta tesis no fue posible validar los resultados obtenidos en el *capítulo 5* y *6*, dado que no se cuenta con algún registro o estudio relacionado o similar a los estudiados en los modelos analíticos realizados, por tanto habrá que esperar los resultados obtenidos en la prueba del espécimen de laboratorio que se diseñó en el capítulo 7 para realizar una comparación de resultados.

Se espera que el espécimen de prueba de laboratorio diseñado en el *capítulo 7*, y actualmente en construcción en el laboratorio de estructuras de la UAM-Azcapotzalco, nos pueda dar luces acerca del comportamiento real de un sistema losa-muro y compararlo con los análisis de esta tesis.

Los coeficientes de momento obtenidos en el *capítulo 8* nos dan una idea de lo delicado que es el diseño de sistemas de losa de transferencia como se ha mencionado en los párrafos anteriores. Se encontró una gran diferencia en la distribución de carga dentro del panel lo que se ve reflejado en como difieren los coeficientes de momentos negativos en el punto 1 y 2 según muestra la *figura 8.1*.

Tales aspectos, nos dicen que sería un grave error de diseño simplemente dividir la carga vertical del muro entre el área de la losa como se hace para los muros divisorios que no son de carga, ya que como se demostró los momentos en el borde perpendicular al eje del muro son mucho mayores que los generados en el borde paralelo. Además los coeficientes encontrados

en el capítulo 8 para los sistemas losa muro solo incluyen la carga en el muro, habría también que estudiar el efecto en los coeficientes al incluir también la carga distribuida sobre la losa.

APÉNDICE A

Propiedades de la mampostería, concreto y acero de refuerzo utilizadas para el diseño y construcción del espécimen de prueba

A.1 INTRODUCCIÓN

En el presente apéndice se muestran las propiedades de los materiales utilizados en el diseño y construcción del espécimen de laboratorio. Estos materiales son la mampostería, concreto y acero, a cada uno de ellos se le hicieron las pruebas de laboratorio correspondientes para obtener y verificar su resistencia. En el caso del concreto se realiza el diseño de las mezclas basados en el método de la PCA (Portland Cement Association), utilizadas para las trabes de apoyo y la losa el cual es un concreto clase 1 y para los castillos y dala a los que les corresponde un concreto clase 2.

A.2 MAMPOSTERÍA

La resistencia de diseño a la compresión de la mampostería la cual está sujeta a la resistencia de la pieza y al mortero, en vista de que al momento de la redacción de la presente tesis no se contaba en el laboratorio con los tabiques que serán utilizados para la construcción de tal forma que se les pudiesen realizar las pruebas de compresión respectiva.

Sin embargo al momento de las pruebas para obtener la resistencia a compresión de la mampostería (f_m^*) utilizada en el muro se debe seguir las especificaciones de la Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería NTCM-2004 como sigue:

$$f_m^* = \frac{f_p}{1 + 2.5c_m} \quad (\text{ecuacion 4.1})$$

dónde:

f_p = Resistencia media a la compresion de las pilas multiplocada por el factor de correccion por esbeltez

c_m = Coeficiente de variacion de la resistencia de las pilas tomado como 0.15

En vista que todas las pilas probadas tenían el mismo tamaño se obtuvo el valor de f_p con la siguiente expresión:

$$f_p = \frac{f_e}{n} \left(\sum_1^n \frac{P_n}{A_n} \right) \quad (\text{ecuacion 4.2})$$

donde:

f_e = Factor de corrección por esbeltez de la pila

n = Numero total de pilas probadas

P_n = Carga de compresión máxima alcanzada en cada pila

A_n = Area bruta transversal de cada pila

Se recomienda utilizar tabiques de barro con dimensiones promedio de 12.5x7x25 centímetros, también el espesor máximo de las juntas o ligas de mortero se limitó a un intervalo comprendido entre 1.0 y 1.2 cm. Se consideró para fines de diseño una resistencia a la compresión diagonal de $v_m^* = 3.0 \text{ kg/cm}^2$ y resistencia a la compresión de 50 kg/cm^2 . Según lo anterior y de acuerdo a la sección 2.8.5 de las NTCM-2004 el módulo de elasticidad de la mampostería en conjunto estará dada por:

$$E_m = 350f_m^* = 350 \times 50 \text{ kg/cm}^2 = 17,500 \text{ kg/cm}^2$$

y su respectivo módulo de cortante se determinó como:

$$G_m = 0.4E_m = 0.4 \times 17,500 \text{ kg/cm}^2 = 7,000 \text{ kg/cm}^2.$$

Lo propuesto en esta sección queda sujeto a las pruebas de laboratorio que se realicen en el laboratorio con los materiales de construcción a utilizar previo la fabricación del espécimen de prueba.

A.3 CONCRETO

A.3.1 Diseño de la Mezcla para $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ (Método PCA)

Para la construcción del espécimen se determinó utilizar un agregado grueso con un tamaño máximo de 19 mm (3/4"), también se consideraron los siguientes datos:

Tabla A.1 Datos para el Diseño de Mezcla de Concreto

	Agregado Grueso	Agregado Fino
Peso Especifico	2.43	2.65
Peso Volumétrico	1550 kg/m ³	1740 kg/m ³
% de Absorción	1.20	2.50
% de Humedad	2.00	5.00
Módulo de Finura		2.80

Apéndice A: Propiedades de la mampostería, concreto y acero de refuerzo utilizadas para la construcción del espécimen de prueba
Edificios Estructurados con Losa de Transferencia

La resistencia media a la compresión según el método de la PCA cuando no existen datos para establecer la desviación estándar en el caso que la resistencia requerida se encuentra dentro del rango de 210-350 kg/cm² está dada por la siguiente expresión:

$$f'_c = f'_{crequerida} + 84 \left(\frac{kg}{cm^2} \right) \text{ (ecuacion A. 1)}$$

Por lo tanto nuestra resistencia media requerida resulta ser 334 kg/cm².

Tabla A.2 Dependencia entre la relación Agua-Cemento y la resistencia a la compresión del concreto

Resistencia a Compresión a los 28 Días, kg/cm ² (MPa)	Relación agua-material cementante en masa	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
450 (45)	0.38	0.31
400 (40)	0.43	0.34
350 (35)	0.48	0.40
300 (30)	0.55	0.46
250 (25)	0.62	0.53
200 (20)	0.70	0.61
150 (15)	0.80	0.72

De la tabla A.2 de acuerdo a la resistencia media requerida y realizando la interpolación correspondiente se obtiene una relación agua-cemento de 0.50 para concreto sin aire incluido. La PCA recomienda para vigas, columnas y muros reforzados revenimientos entre 25 a 100 mm, por lo tanto se utilizara 100±25 mm para proporcionar.

Con la tabal A.3 se puede obtener aproximadamente la cantidad de agua necesaria por metro cubico de concreto que depende del revenimiento y del tamaño máximo nominal del agregado grueso utilizado, en donde para nuestro caso necesitamos 205 kg de agua por metro cúbico de concreto.

Tabla A.3 Requisitos aproximados de agua de mezcla y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregados.

Revenimiento (asentamiento) (mm)	Agua, kilogramos por metro cúbico de concreto, para los tamaños de agregado indicados*							
	9.5 mm	12.5 mm	19 mm	25 mm	37.5 mm	50 mm**	75 mm**	150 mm**
Concreto sin aire incluido								
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 a 175	243	228	216	202	190	178	160	—
Cantidad aproximada de aire atrapado en un concreto sin aire incluido, porcentaje	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2

**Apéndice A: Propiedades de la mampostería, concreto y acero de refuerzo utilizadas para
la construcción del espécimen de prueba
Edificios Estructurados con Losa de Transferencia**

Entonces con el siguiente cálculo se puede determinar la cantidad de cemento necesaria:

$$\text{Cantidad de Cemento (kg)} = \frac{\text{Cantidad de Agua (kg/m}^3\text{)}}{\text{Relacion } \frac{a}{c}} = \frac{205 \text{ kg}}{0.50} = 410 \text{ kg/m}^3$$

Ahora se pasa a obtener la cantidad de agregado grueso la que en este caso depende del módulo de finura del agregado fino según nos muestra la tabla A.4.

Tabla A.4 Volumen de Agregado Grueso por volumen unitario de concreto

Tamaño máximo nominal del agregado mm (pulg.)	Volumen del agregado grueso varillado (compactado) en seco por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura de agregado fino*			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5 (3/8)	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5 (1/2)	0.59	0.57	0.55	0.53
19.00 (3/4)	0.66	0.64	0.62	0.60
25.00 (1)	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5 (1 1/2)	0.75	0.73	0.71	0.69
50 (2)	0.78	0.76	0.74	0.72
75 (3)	0.82	0.80	0.78	0.76
150 (6)	0.87	0.85	0.83	0.81

Según la tabla A.4 para el tamaño máximo nominal de agregado y módulo de finura de 2.80 se obtiene el valor de 0.62. Con el valor anterior multiplicado por peso volumétrico seco del agregado grueso se obtiene la el volumen unitario de agregado grueso requerido, como sigue:

$$0.62 \times 1,550 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 961 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Ahora se dispone a obtener el volumen unitario de agregado fino el cual se determina al dividir las cantidades encontradas por su peso específico multiplicado por el peso volumétrico del agua y luego restandole esos valores a la unidad como sigue:

$$\text{Agua} = \frac{205}{1 \times 1000} = 0.205 \text{ m}^3$$

$$\text{Cemento} = \frac{410}{3 \times 1000} = 0.137$$

$$\text{Agregado grueso} = \frac{961}{2.43 \times 1000} = 0.395$$

Por lo tanto el volumen de agregado fino requerido resulta ser de $1 - 0.205 - 0.137 - 0.395 = 0.263 \text{ m}^3$ y la cantidad de agregado fino es $0.263 \times 2.65 \times 1000 = 696.95 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

Sin embargo se debe hacer una correccion a las cantidades anteriores ya que se debe tomar en cuenta el porcentaje de humedad y de absorcion de los materiales. En base a la tabla A.1 se tiene que:

$$\text{Agregado grueso (CH2\%)} = 961 \times 1.02 = 980.22 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Agregado fino (CH5\%)} = 686.95 \times 1.05 = 731.79 \text{ kg/m}^3$$

A continuación se obtiene el valor de la cantidad de agua corregida por absorcion:

$$205 - 961 \times (0.02 - 0.012) - 731.79 \times (0.05 - 0.025) = 177.76 \text{ kg/m}^3$$

Finalmente un metro cubico de concreto tiene las siguientes cantidades:

Tabla A.5 Resumen de cantdades unitarias por metro cubico

	En peso (kg)	En Volumen (m ³)
Agua	179	0.178
Cemento	410	
Agregado Grueso	980	0.632
Agregado Fino	732	0.536
Total	2301	

A.4 ACERO

El acero el diámetro de acero predominante en la construcción del espécimen fue del No.3 el cual fue utilizado para el refuerzo de la losa, de los castillos y de la dala. Sin embargo también se utilizaron barras del No.6 en el armado de las trabes de apoyo. Fue preciso por ende realizarle pruebas de resistencia al acero utilizado en el espécimen esto con el fin de ir eliminando incertidumbres acerca de la misma y utilizar los resultados con confianza al momento del diseño. De acuerdo a las figuras A.2 y A.3 se determinó que utilizar para el diseño el valor de $f_y = 4200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ resulta ser muy apropiado.



Figura A.1 Prueba de resistencia del acero de refuerzo

Apéndice A: Propiedades de la mampostería, concreto y acero de refuerzo utilizadas para la construcción del espécimen de prueba
Edificios Estructurados con Losa de Transferencia

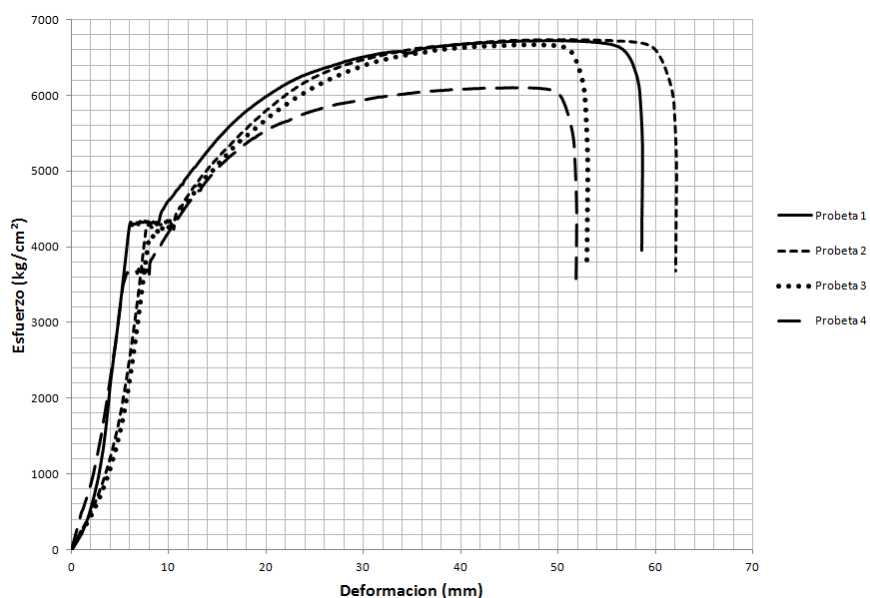


Figura A.2 Gráficos de Esfuerzo - Deformación para probetas de barras No.3

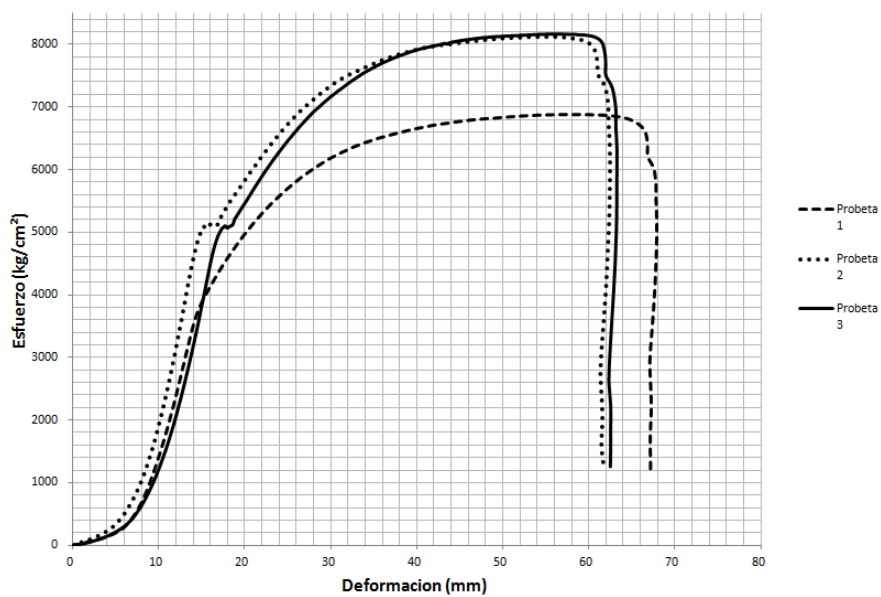


Figura A.3 Gráficos de Esfuerzo - Deformación para probetas de barras No.6

APÉNDICE B

Análisis de rigidez a flexión del sistema muro - losa

B.1 INTRODUCCIÓN

En este apéndice se establece la relación de rigidez entre el muro y la losa y su efecto en el comportamiento del sistema estructural en general. Sin embargo se debe mencionar la influencia que tiene la rigidez flexionante de la viga perimetral sobre la de la losa. Ese tema aunque de mucha trascendencia en estos sistemas de piso ya ha sido estudiado bastante por lo que no se ahondara en ello.

La relación de ambas rigideces influye en la distribución de momentos a lo largo de una franja de losa. De acuerdo a lo anterior si las vigas son de peralte mayor que la losa, un gran porcentaje del momento total será resistido por las vigas y un porcentaje menor por la losa (González Cuevas, 2005). En este sentido se ha observado que la mayoría de los sistemas de piso de transferencia con losa con paneles perimetralmente apoyados poseen sistemas de vigas muy rígidos y aperaltados teniendo generalmente un peralte muchas veces mayor al espesor de la losa.

Por otra parte también se tiene el efecto de la rigidez torsional, el cual resulta importante especialmente en tableros de borde o internos, sobre todo cuando hay gran diferencia en la magnitud de carga aplicada en un panel y el adyacente.

Para que el efecto torsionante se presente, las vigas y la losa deben estar coladas monolíticamente, si no se cumple esta condición las vigas no pueden restringir o empotrar la losa, y no pueden desarrollarse momentos flexionantes en la losa en los bordes de la misma (Gonzales Cuevas, 2005).

Para efectos de esta tesis, y con base en los párrafos anteriores se supone a la losa perfectamente empotrada en sus bordes de apoyo; es decir, que los apoyos son infinitamente rígidos. Aunque esta condición no es estrictamente cierta en edificios reales, sin embargo tampoco está muy alejada de la realidad, en vista del gran peralte de las vigas en relación con el de losas observados en algunos sistemas de piso de transferencia.

B.2 ANÁLISIS DE RIGIDECES

Ahora se analiza la relación de la rigidez a la flexión entre el muro y la losa. Para este análisis no se incluyen las deformaciones por cortante y además se considera al muro como una viga esbelta de gran peralte.

Apéndice B: Análisis de rigidez a flexión del sistema muro - losa
Edificios Estructurados con Losa de Transferencia

La rigidez a flexión de una placa está dada por la expresión:

$$D = \frac{E_L e^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (B.1)$$

Dónde:

D = medida de la rigidez a flexión de la placa

E_L = módulo de elasticidad del material de la losa

e = espesor de la losa

ν = módulo de Poisson del material de la losa

De la misma forma se expresa la rigidez a la flexión del muro, dividida por su longitud:

$$M = \frac{E_m I}{L} \quad (B.2)$$

Donde:

E_m = módulo de elasticidad del material del muro

I = Momento de Inercia de la sección transversal del muro

L = Longitud del Muro

Si se define que la relación de rigideces es: $R = \frac{M}{D}$; al sustituir los valores respectivos se tiene que:

$$R = \frac{M}{D} = \frac{12E_m I(1 - \nu^2)}{E_L e^3 L} \quad (B.3)$$

Se sabe que el muro tiene una sección transversal $b \times h$, donde b es el espesor del muro, h la altura y L su longitud, por consiguiente $I = \frac{bL^3}{12}$, sustituyendo en B.3.

$$R = \frac{E_m b h^3 (1 - \nu^2)}{E_L e^3 L} \quad (B.4)$$

Ahora bien si $n = \frac{h}{e}$ y $m = \frac{E_L}{E_m}$, al sustituir en B.4 se tendría una expresión general para relacionar ambas rigideces:

$$R = \frac{b n^3 (1 - \nu^2)}{m L} \quad (B.5)$$

En el caso en que el módulo de elasticidad del material de la losa y del muro son idénticos entonces se tendría que $m = 1$ por lo tanto:

Apéndice B: Análisis de rigidez a flexión del sistema muro - losa
Edificios Estructurados con Losa de Transferencia

$$R = \frac{bn^3(1 - v^2)}{L} \quad (B.6)$$

Por ejemplo, para el muro de mampostería de 2.50 m de longitud, sección transversal de 12.5x250 cm, módulo de *Poisson* de 0.20, y una losa de 12 cm de espesor, se tendría que $n = 20.83$.

Además si $E_L = 200,000 \text{ kg/cm}^2$ y $E_m = 15,000 \text{ kg/cm}^2$, se tendría que $m = 13.33$, y al sustituir los valores anteriores en B.5 se llega a:

$$R = \frac{12.5 \times 20.83^3 (1 - 0.20^2)}{13.33 \times 250} = 32.54$$

Ahora si se considera que el muro es de concreto con un módulo de elasticidad igual al de la losa se usa la ecuación B.6, y al suponer los mismos valores se tiene que:

$$R = \frac{12.5 \times 20.83^3 (1 - 0.20^2)}{250} = 433.82$$

De los resultados para R se observa un gran contraste en las rigideces entre ambos muros,, cabe mencionar que en el caso del muro de mampostería no se tomó en cuenta el concreto de los castillos por lo que para un cálculo más refinado se deberá hacer una transformación para obtener un muro con propiedades equivalentes.

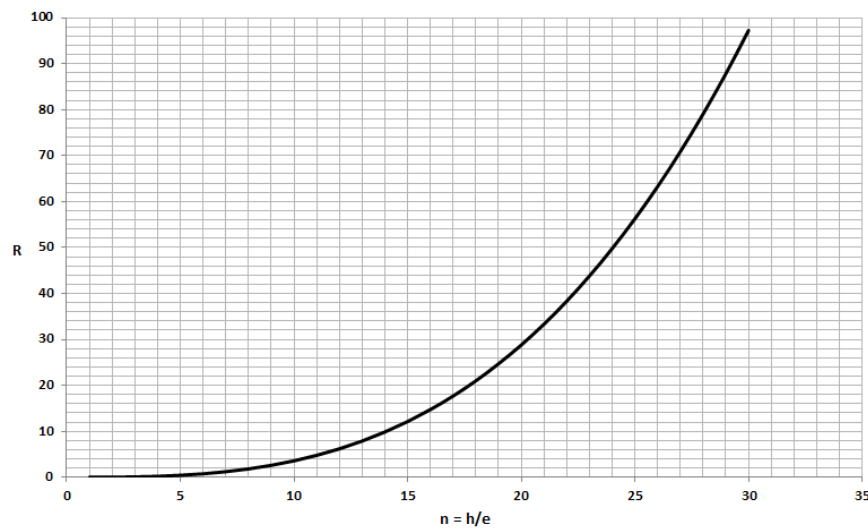


Figura B.1 Grafico que relación n y R , para Muro de mampostería

Con base en la ecuación B.5 se elaboró la gráfica de la figura B.1, en donde se varió el valor de n y se mantuvieron las otras constantes ($L=2.50 \text{ m}$, $e=12 \text{ cm}$, $m=13.33$, $v=0.20$, $b=12.5 \text{ cm}$). Se observa que los resultados son esperados ya que a medida que aumenta el peralte del muro, su rigidez también se incrementa en una potencia de tres. Aún más interesante es la gráfica de la

Apéndice B: Análisis de rigidez a flexión del sistema muro - losa

Edificios Estructurados con Losa de Transferencia

figura B.2 que relaciona la longitud del muro y la relación de rigideces del muro y la losa, se ve que a medida que aumenta de longitud del muro su rigidez se ve disminuida, es por tal motivo como se mencionó anteriormente, que el modelo M4_M3_12V se agrieta en mayor medida que el modelo M2_M2.5_12V.

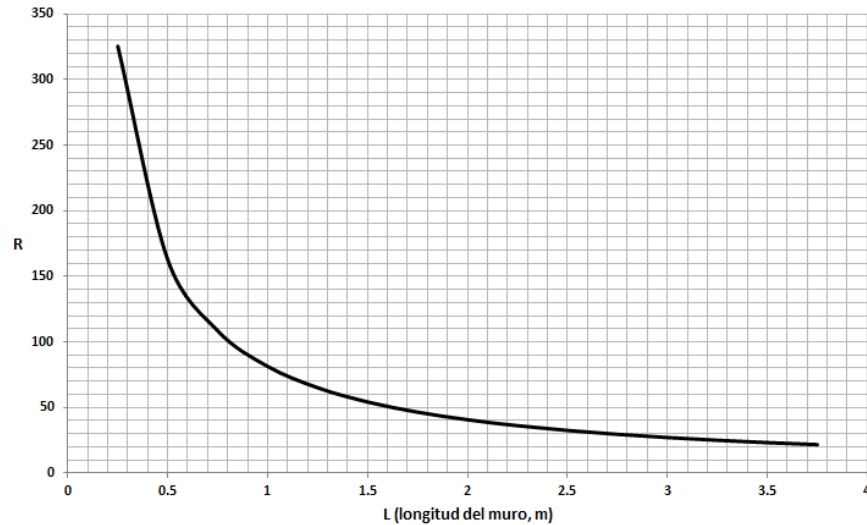


Figura B.2 Gráfico que relación L y R, para muro de mampostería

Por su parte las figuras B.3 y B.4 indican las mismas relaciones que las figuras B.1 y B.2, con la diferencia que las primeras lo hacen para muros de concreto donde el módulo de elasticidad de la losa y del muro son iguales, por lo que $m = 1$.

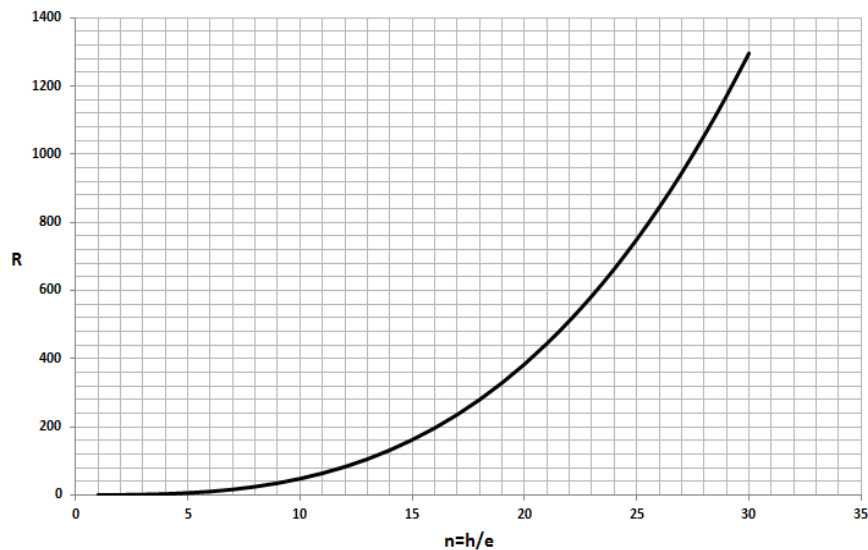


Figura B.3 Gráfico que relación n y R, para muro de concreto

Apéndice B: Análisis de rigidez a flexión del sistema muro - losa
Edificios Estructurados con Losa de Transferencia

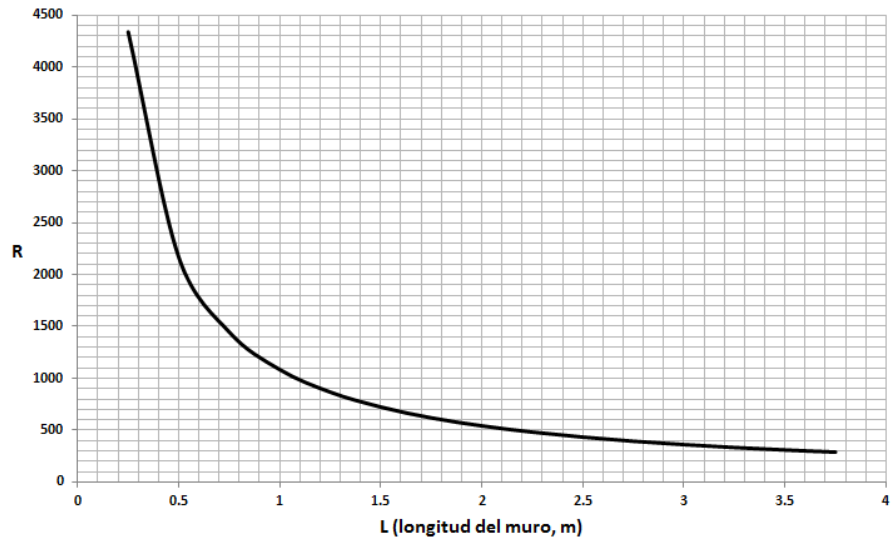


Figura B.4 Gráfico que relación L y R, para muro de mampostería

A partir del análisis realizado en esta sección es posible identificar con claridad las diferencias en los valores máximos entre las gráficas de muros de concreto y mampostería, alcanzando los muros de concreto una gran rigidez respecto a los de mampostería, esta es la razón por la cual los modelos de concreto analizados experimentan un agrietamiento mínimo.

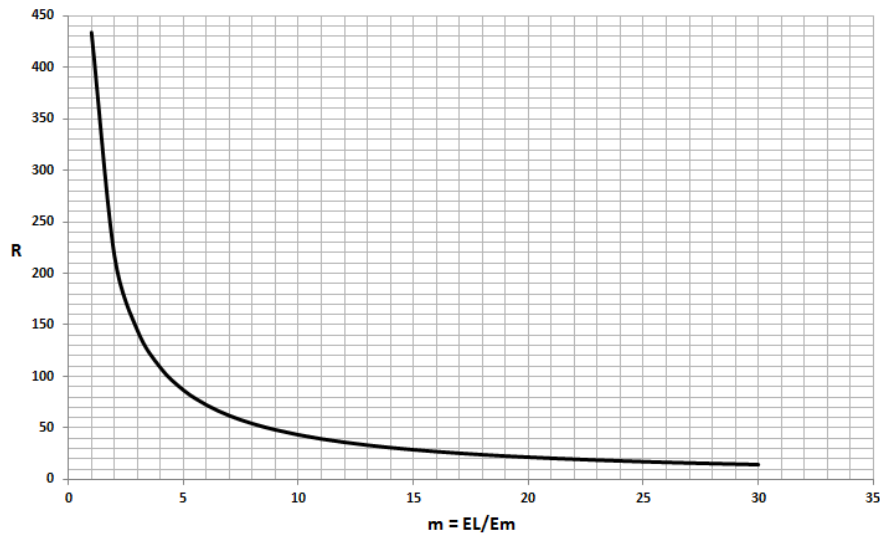


Figura B.5 Gráfico que relación m y R, para muro de mampostería

No menos interesante resulta la gráfica de la *figura B.5*, donde se muestra el impacto en el contraste de rigideces de acuerdo a la diferencias entre módulos de elasticidad, estando en los extremos de la gráfica los casos de mampostería y el concreto.

APÉNDICE C

ESTADOS LIMITES MODELOS MURO-LOSA

C.1 INTRODUCCIÓN

En el *Capítulo 6* se realizó un estudio de los estados límites que se presentan en los diferentes modelos analizados estableciendo límites de distorsión en cada caso y para cada límite propuesto. A continuación se relaciona el estado de agrietamiento de los modelos con cada estado límite, para ello se decidió utilizar los modelos M12_M3_12VL y M11_C3_12VL, en el primero se esquematiza el agrietamiento del muro y en el segundo el de la losa. Lo anterior es debido a que en los modelos con muro de mampostería es este el que define la capacidad de la estructura, en cambio en los de concreto es la losa el elemento determinante.

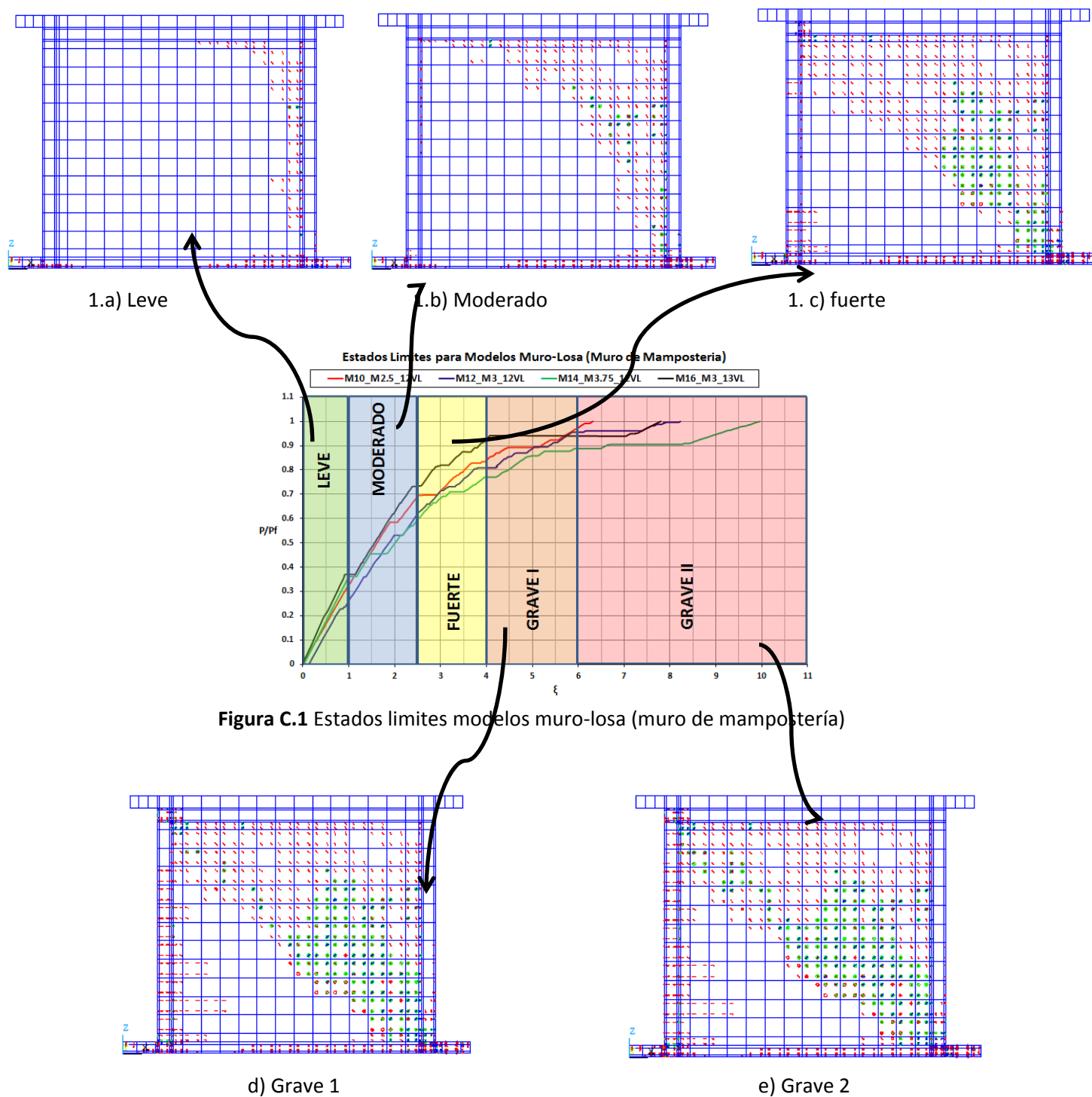
C.2 MODELO M12_M3_12VL

Se presenta la *tabla C.1* que describe las características de daño en cada estado límite:

Tabla C.1 Características de deterioro sistemas losa – muro con muro de mampostería

Estado de Daño	ξ	Distorsión	Estado Límite
-Grietas cercanas al castillo opuesto de la aplicación de la carga, especialmente en su parte superior. Se observa agrietamiento en la losa en la zona donde se ejerce el puntal de compresión. Estado Límite de Servicio.	1.0	0.0004	Leve
-Agiertamiento extendido en la zona superior del muro y más evidente en las áreas aledañas al castillo opuesto al punto de aplicación de la carga. Agrietamiento por flexión y punzonamiento en la losa se extiende hasta la mitad del claro. Estado límite de Operación	2.5	0.0009	Moderado
-Agiertamiento generalizado sobre la diagonal superior. Agrietamiento por tensión diagonal. Aparecen grietas de compresión y tensión en los castillos confinantes.	4.0	0.0015	Fuerte
-Fisuramiento del castillo en tensión se extiende hasta $\frac{3}{4}$ de su altura. Se observa aplastamiento en la parte inferior del castillo a compresión y en la losa en la misma zona. Se observa a través de las grietas el puntal de compresión diagonal muy bien definido.	6.0	0.0022	Grave I

-Daño generalizado en el castillo en tensión. >6.0 ---- Grave II
Agrietamiento diagonal en amplias zonas del muro.
Aplastamiento del concreto y mampostería en las
esquinas de la diagonal a compresión. Estado Ultimo.

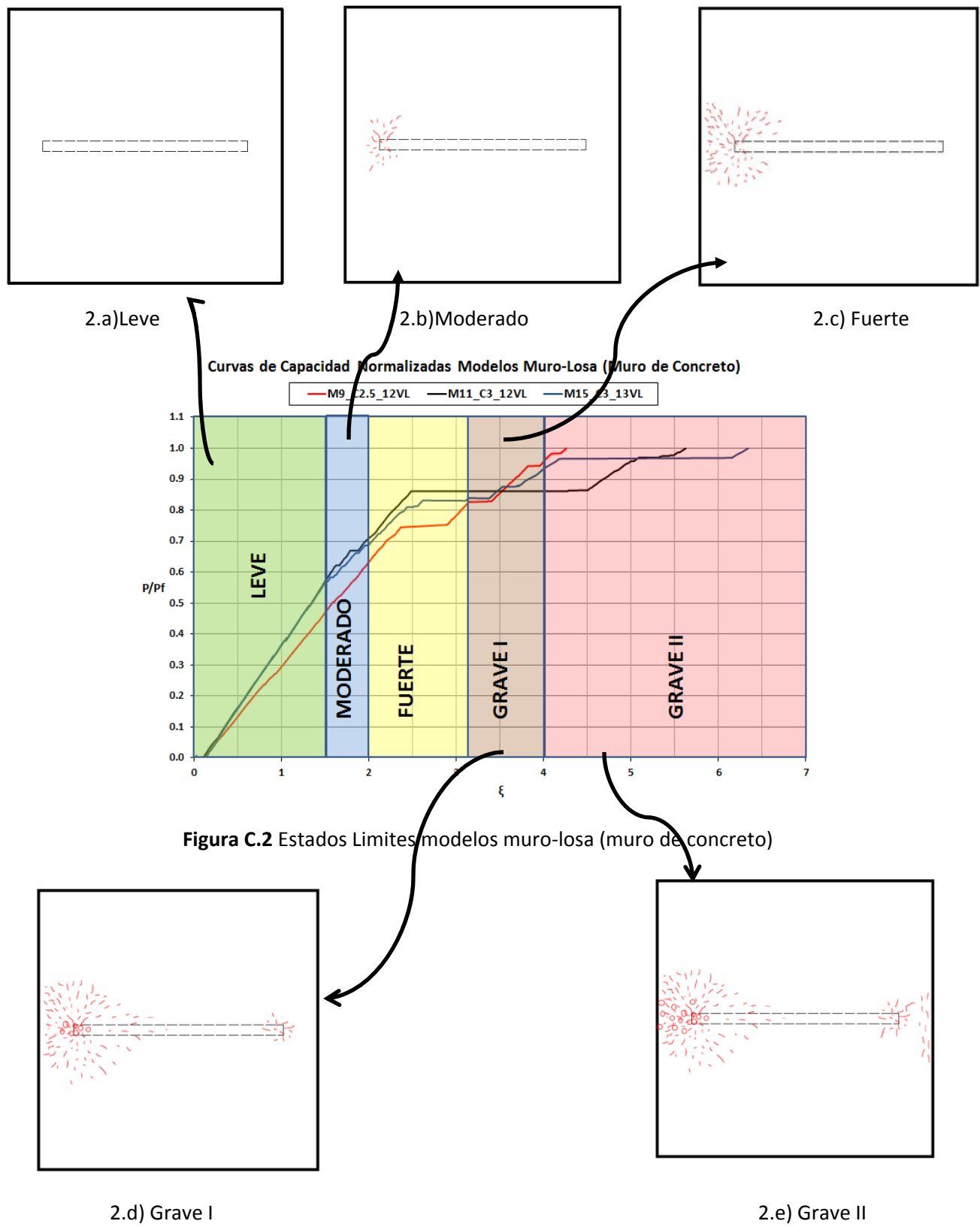


C.3 MODELO M11_C3_12VL

Como se ve en las figuras 6.18 y 6.19 del *Capítulo 6*, los muros de concreto que pertenecen a los sistemas losa-muro prácticamente no sufren daño, estos simplemente tienden a rotar como cuerpos rígidos al momento que se aplica la carga lateral, este aspecto es sumamente nocivo para la losa en vista de que esta es punzonada por una de las esquinas inferiores de muro provocando serios aplastamientos en la cara superior de la losa y agrietamientos en la superficie inferior. Por tal motivo en la *tabla C.2* también se ha incluido el desplazamiento vertical de la losa en el punto en donde se encuentra la esquina a compresión del muro.

Tabla C.2 Características de deterioro sistemas losa – muro con muro de concreto

Estado de Daño	ξ	Distorsión	Desp. Vertical (mm)	Estado Limite
- No se presenta figuración alguna, el sistema se encuentra en el rango elástico lineal.	1.5	0.0006	1.2	Leve
- Se inicia el agrietamiento en la losa específicamente en las áreas cercanas a los extremos del muro. A este punto el muro se encuentra prácticamente intacto.	2.0	0.0007	1.7	Moderado
-Se observa incremento notable de agrietamiento hacia todas direcciones específicamente en la zona en donde se encuentra la esquina a compresión. El resto de la estructura no sufre daño.	3.2	0.0012	2.0	Fuerte
-Se aplasta el concreto al pie del castillo a compresión así como parte del concreto del mismo castillo en su zona baja. Agrietamientos considerables en la cara inferior de la losa bajo el castillo. Se inicia una figuración leve en la zona de la losa del castillo que está a tensión.	4.0	0.0015	3.6	Grave I
-Daño generalizado de aplastamiento y agrietamiento de la losa en la zona alrededor de la esquina a compresión. Aparecen grietas por tensión al pie del muro en la esquina la esquina a tensión.	>4.0	----		Grave II



C.4 DISCUSIÓN

La descripción de cada uno de los estados límites que se presentan en este apéndice es válida solo para los modelos citados en el mismo (*M11_C3_12VL* y *M12_M3_12VL*) debido a que cada modelo analizados presenta distorsiones diferentes en cada estado limite. sin embargo, existe un factor que conecta y estandariza los estados límites de los modelos generados, el factor de normalización ξ , a través del cual y basados en su valor para cada estado límite se puede inferir en forma aproximada acerca del estado de daño en que se encuentra el sistema.

Por ejemplo en sus estudios Ruiz-García et al., 1998 o Astroza y Schmidt, 2004 (tabla C.1) proponen valores de distorsión para cada estado limite, sin embargo en los sistemas losa muro esa tarea se vuelve más compleja debido a que no existe un comportamiento homogéneo bien definido en los sistemas analizados, por tal razón los estados limites no se pueden establecer directamente en base a la distorsión que se presenta en el muro sino que a través de un valor ξ que normaliza los datos de desplazamientos que se dan en una de las esquinas superiores del muro, tal factor se detalla en la sección 6.9.

Tabla C.1 Estados límites para mampostería confinada (Astroza y Schmidt,2004)

Estado Limite	Distorsión (%)
Estado límite de servicio	0.05
Estado limite operacional	0.10
Estado límite de daño controlado	0.17
Estado límite de resistencia	0.22
Estado Limite ultimo	0.44

Para ilustrar lo mencionado en los párrafos anteriores la *tabla C.1* muestra los estados límites propuestos en un estudio de muros de mampostería confinada en donde tales límites de daño son muy similares a los establecidos para el modelo *M12_M3_12VL*, sin embargo al compararlos con los demás modelos con muros de mampostería mostrados en la *tabla 6.5* del *capítulo 6* los estados limites difieren en gran medida.

APÉNDICE D

Modelos sometidos a cargas cíclicas

D.1 INTRODUCCIÓN

Como parte del estudio realizado se han elaborado dos modelos en elementos finitos sometidos a carga cíclica. Uno de los objetivos principales en esta sección es comparar la degradación de la rigidez a través de las curvas de historial de carga y distorsión lateral de un sistema de losa de transferencia y de un sistema sobre base rígida. La *tabla D.1* muestra la nomenclatura utilizada para los dos modelos analizados en esta sección, con la única diferencia con respecto a la nomenclatura anteriormente usada es que se incluyen al final del nombre las letras “CIC” haciendo referencia a que los modelos son ejecutados bajo carga cíclica.

Tabla D.1 Modelos sometidos a carga cíclica

Modelo	Concreto	Mampostería	Longitud Muro (m)	Figura
M17_M2.5_12CIC		X	2.50	5.2.a
MBR_M2.5CIC		X	2.50	5.2.a

Cabe hacer notar que no es propósito principal del presente estudio y especialmente de este apéndice el obtener el comportamiento histerético exacto y detallado de ambos sistemas sino más bien es realizar comparaciones generales que muestren diferencias evidentes entre ambas estructuras. La figura D.2 muestra el protocolo de carga aplicado a cada uno de los modelos realizados, se procuró que ambos protocolos fuesen los más parecidos posibles para que las comparaciones entre ambos modelos fuesen válidas.

Se debe mencionar que para los modelos cíclicos no se está simulando la descarga que generalmente se realiza en modelos experimentales, una vez que el muro es empujado hacia un extremo, es por tal motivo que se aprecia en la *figura D.2* que las curvas independientemente de que se observe un comportamiento no lineal estas siempre regresan al origen en donde para una carga nula se va obtener una distorsión muy aproximada a cero, es decir que cuando la carga llega a ser cero en cada curva no se observa una distorsión remanente de la carga anterior como generalmente se da en una curva de histéresis.

Debido a lo anterior las curvas mostradas en la figura D.2 no se pueden tomar como curvas reales de histéresis, a pesar de que se sabe que histéresis se define como la propiedad de un material a conservar alguna de sus propiedades, en ausencia de algún

estimulo generado, por tanto en este caso es la rigidez la propiedad que se modifica en el sistema y como se observa en la *figura D.1* efectivamente dicha propiedad se ve afectada, sin embargo como se ha demostrado en muchos trabajos experimentales, la estructura debe sufrir deformaciones residuales una vez que esta entra en un comportamiento no lineal, por tanto las gráficas de la *figura D.1* son meramente ilustrativas y solo son útiles para realizar ciertas comparaciones.

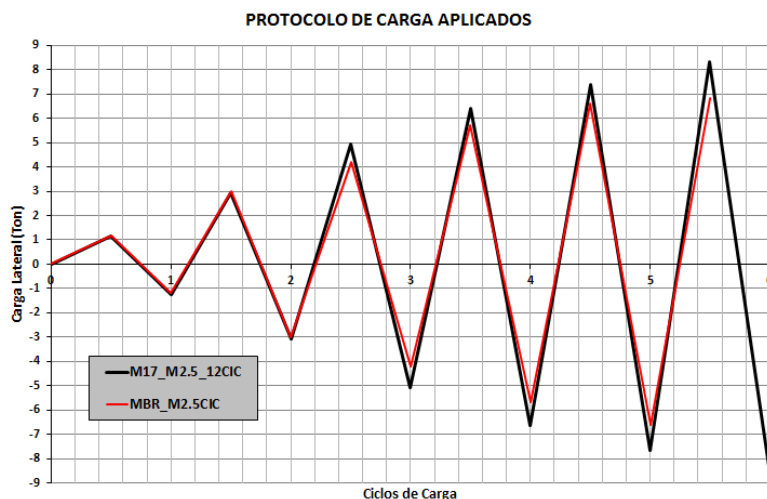


Figura D.1 Protocolos de Carga Utilizados

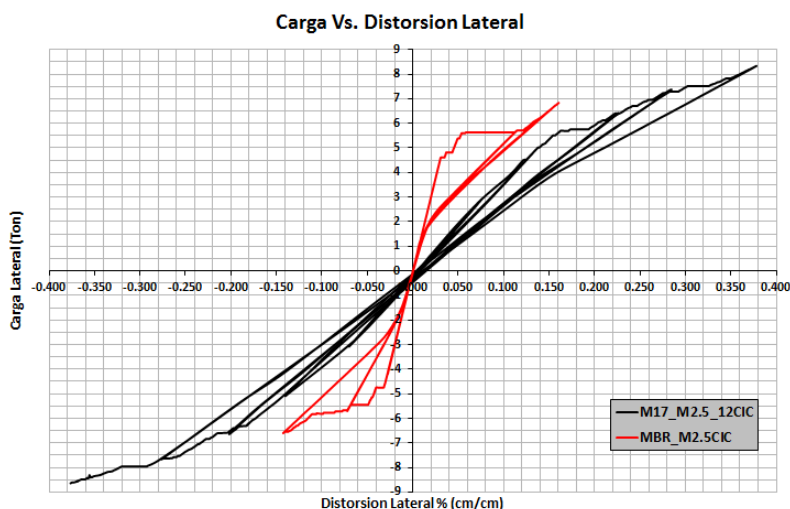


Figura D.2 Historial de carga y distorsiones laterales de los modelos analizados

En lo que a la rigidez de ambos sistemas se observa en la *figura D.2* que el modelo sobre base rígida posee una rigidez inicial mayor que el que está apoyado sobre la losa. Lo anterior resulta bastante lógico e intuitivamente predecible en vista como se ha estudiado hasta en el sistema de losa de transferencia una parte de la energía de deformación generada es absorbida por la propia losa, cosa que no ocurre en el sistema de base rígida.

Por otra parte el hecho de que el muro este apoyado sobre una losa que puede deformarse favorece en mayor o menor medida la capacidad total de deformación lateral del muro como se observa en la *figura D.2*, sin embargo como ya se ha comentado, este efecto tiene su contraparte negativa afectando la losa en gran medida, generando en desplazamientos verticales concentrados, a causa de un puntal de compresión provocado por la aplicación de la carga lateral.

Además, en el presente apéndice se muestra una comparación paso a paso del historial de carga y distorsión lateral y el grado de agrietamiento al final de cada ciclo de carga observado en el muro del modelo M17_M2.5_12CIC. Como se pueden ver las figuras a la derecha las cuales muestran un agrietamiento esquemático del muro, reflejando el estado de esfuerzos de los puntos de integración de cada elemento finito en donde cada uno de ellos puede agrietarse en sus tres planos principales, siendo el color rojo la primera grieta, el verde la segunda y el azul la tercera grieta.

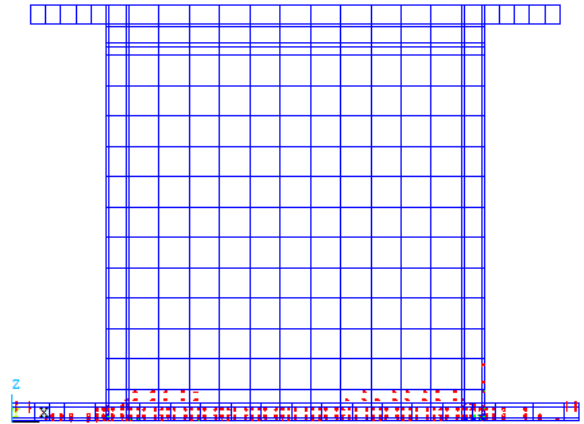
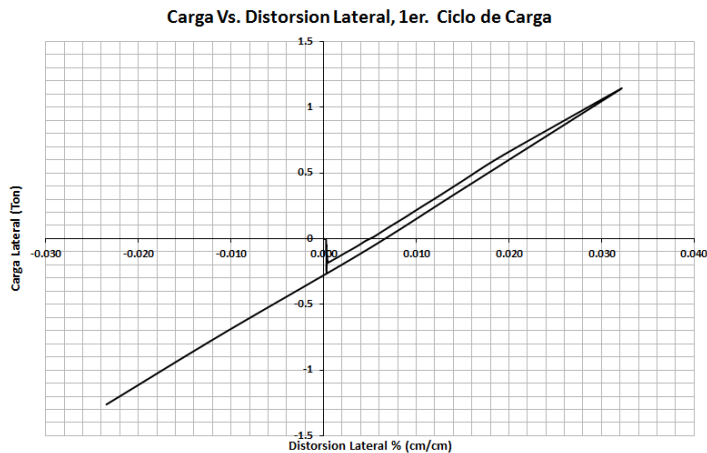


Figura D.3 Primer ciclo de carga

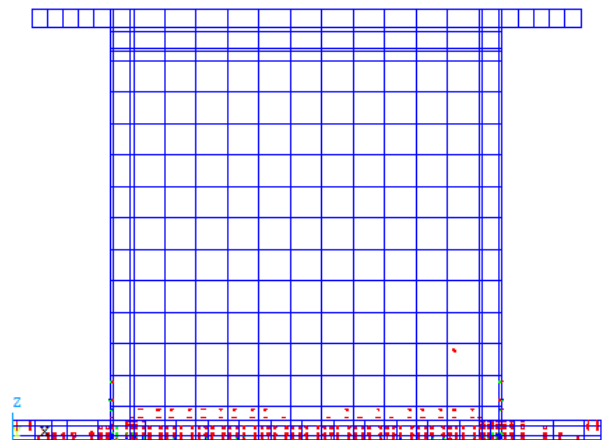
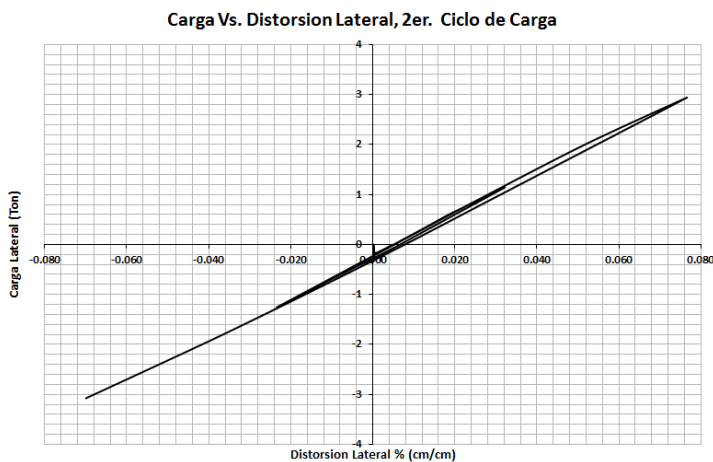


Figura D.4 Segundo ciclo de carga

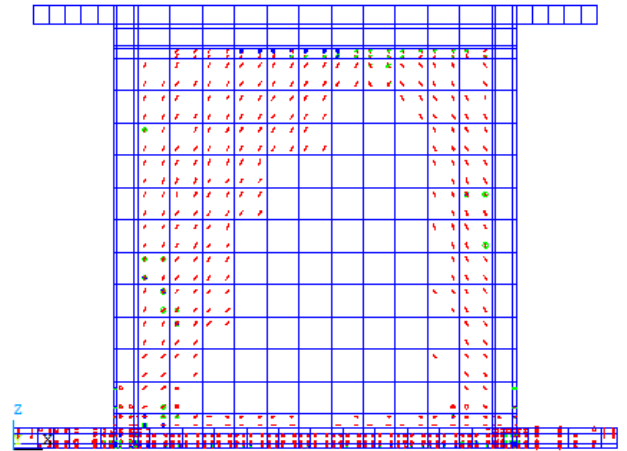
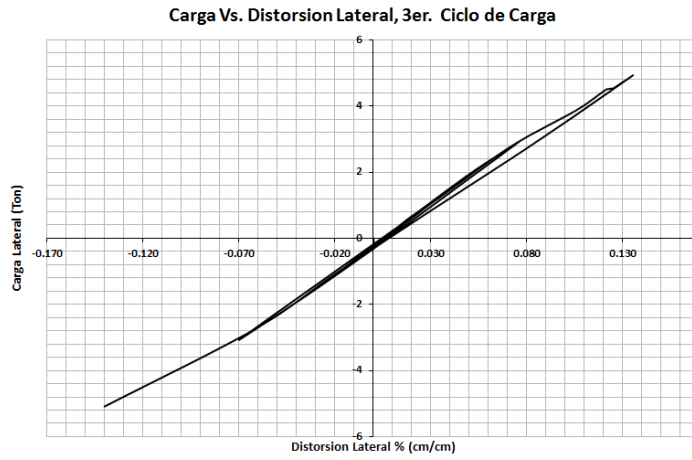


Figura D.5 Tercer ciclo de carga

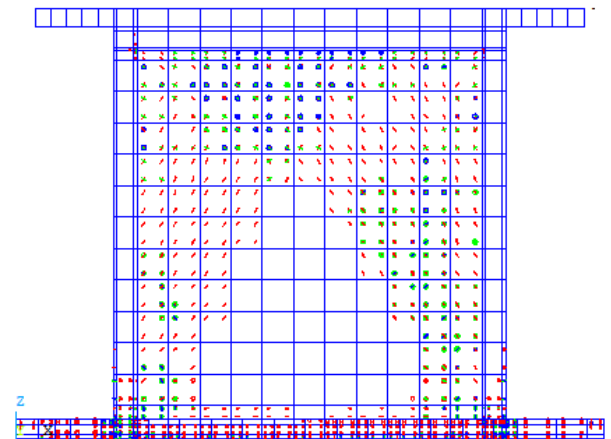
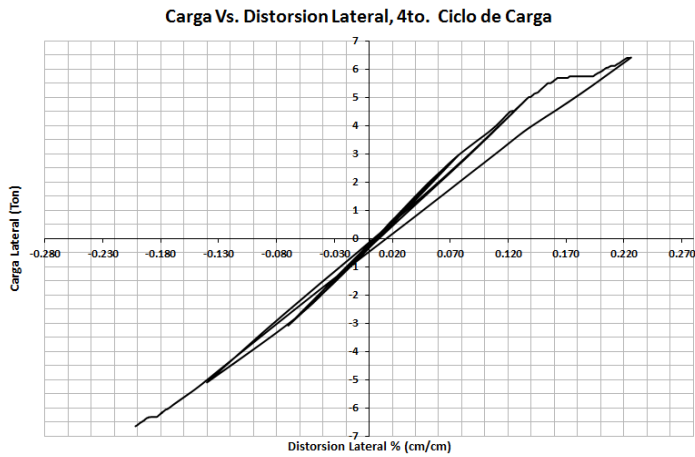


Fig. D.6 Cuarto ciclo de carga

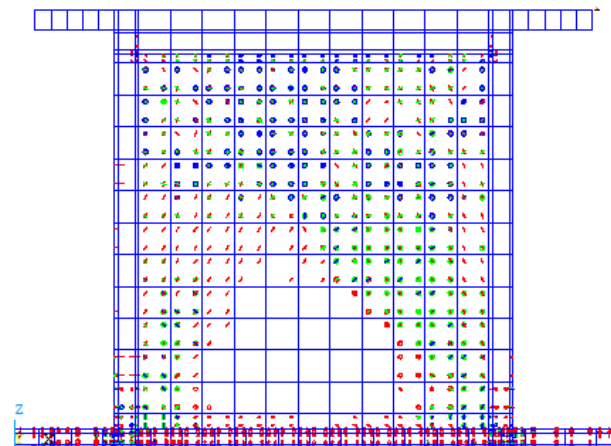
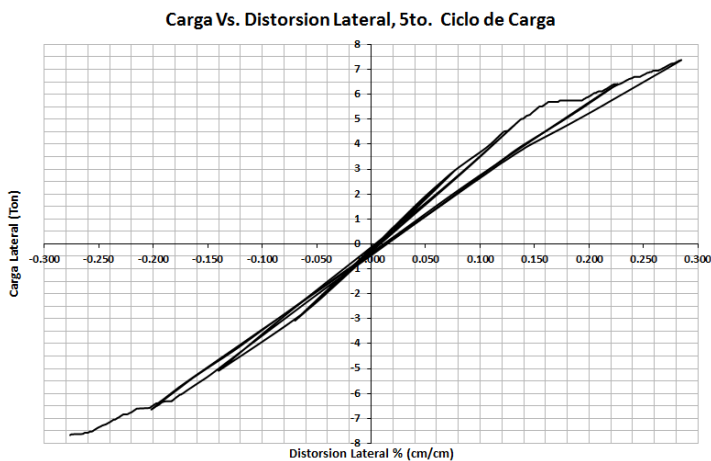


Figura D.7 Quinto ciclo de carga

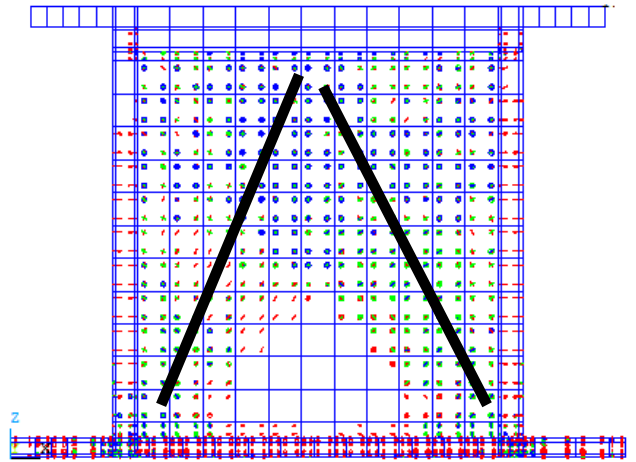
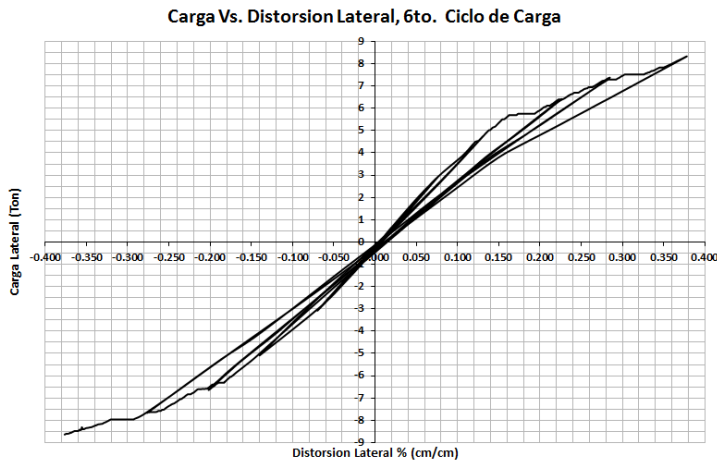


Figura D.8 Sexto ciclo de carga

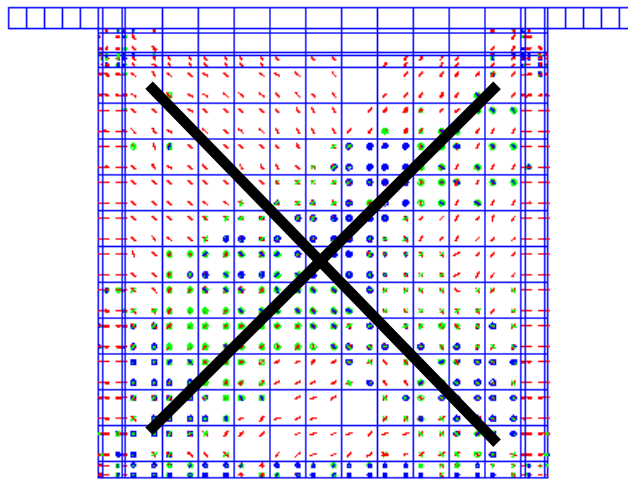


Figura D.9 Estado Final de Agrietamiento Modelo MBR_M2.5CIC

Es importante destacar el hecho de las diferencia en el patrón principal de agrietamiento ultimo entre el sistema sobre base rígida (figura D.9) y el apoyado sobre losa (Figura D.8). En donde el primero muestra una típica forma de cruz de un espécimen sometido a carga cíclica, mientras el segundo el patrón difiere tendiendo a tener más bien la forma de una V invertida.

REFERENCIAS

- M.C. Gómez Soberón , A. Gómez Bernal, O. M. González Cuevas, A. Terán Gilmore, M. Ruiz Sandoval H., O. Zúñiga Cuevas, C. Carpio Pacheco, I. T Martín Del Campo Hernández, “Estudio sobre la observancia del Reglamento de Construcciones del D.F. y sus Normas Técnicas Complementarias” *Informe Final División de C.B.I., Dpto. Materiales, Área de Estructuras. Reporte de investigación patrocinada por la Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno del D. F. bajo el Convenio CT/04/07.* Junio de 2009.
- R.E. Woodring, C.P. Siess, “An Analytical Study of the Moments in Continuous Slabs Subjected to Concentrated Loads”, *Structural Research Series No. 264*, 1963.
- NTCC, “Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto”, Gaceta Oficial del Distrito Federal, México, 2004.
- NTCS, “Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo”, Gaceta Oficial del Distrito Federal, México, 2004.
- O.M. Gonzales Cuevas, F. Robles, “Aspectos Fundamentales del Concreto Reforzado”, 4ta. Ed., LIMUSA, 2005.
- G. Kennedy, C. Goodchild, “Practical Yield Line Design”, 1st. Ed., British Cement Association, 2005.
- RCDF , “Reglamento de construcciones del Distrito Federal”. Gaceta Oficial del Distrito Federal. México. 2004.
- K.W. Johansen, *Brudlinieteorier*. Jul. Gjellerups Forlag, Copenhagen, 1943, 191pp. (Yield Line Theory, Traslated by Cement and Concrete Association, London, 1982. 181pp).
- R. Park, W.L. Gamble, “Reinforced Concrete Slabs”, 2nd. Ed., John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- A. Sawczuk, T. Jaeger, “Grenztragfähigkeits Theorie der Platten”, Springer-Verlag, Berlin, 1963.
- F.J. Vecchio, K. Tang, “Membrane Action in Reinforced Concrete Slab”, *Can. J. Civ. Eng.* 17, 686-697 (1990).
- D.C. Hopkins, R. Park, “Test on a Reinforced Concrete Slab and Beam Floor Designed with Allowance for Membrane Action”, *Cracking, Deflection and Ultimate Load of Concrete Slab Sistem*, ACI Special Publication 30, 1971.
- NTCCA, “Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de Edificaciones”, Gaceta Oficial del Gobierno del Distrito Federal, 2004.

- Q. Zhang, *"Finite Element Applications to Slab-Column Connections Reinforced with Glass Fibre-Reinforced Polymers"*, 2004.
- ANSYS, *"ANSYS 12.0.1"*, ANSYS Inc. Estados Unidos, 2009.
- H.I. Archundia, A. Tena, O. M. Gonzales Cuevas *"Estudio Experimental del Cortante Estático en Trabes Acarteladas de Concreto Reforzado"*, Reporte de Investigación No. 453, 2005.
- L. Dahmani, A. Khennane, S. Kaci, *"Crack Identification in Reinforced Concrete Beams Using ANSYS Software"*, 2010.
- S. Tickoo, V. Singh, *"ANSYS 11.0 for Designers"*, CADCIM Technologies, 2009.
- F.P. Beer, E. R. Johnston, J.T. DeWolf, *"Mecánica de Materiales"*, 3rd. Ed., Mc. Graw-Hill, 2001.
- B. Andreasen, M.P. Nielsen, *"Dome Effect in Reinforced Concrete Slabs"*, Serie R No. 212, 1986.
- S. Timoshenko, S. Woinowski-Krieger, *"Theory of Plates and Shells"*, 2nd. Ed., McGraw-Hill, 1959.
- S.M. Alcocer, L.E. Flores, *"Estudio Analítico de Estructuras de Mampostería Confinada"*, CENAPRED, 2001.
- A.G. Ayala, A. Orduña, *"Análisis no Lineal de Muros de Mampostería Confinada Sujetos a Cargas Laterales"*, Instituto de Ingeniería, UNAM, 2001.
- A. Teran-Gilmore, O. Zuniga Cuevas, *"Evaluación Basada en Desplazamientos de Edificaciones de Mampostería Confinada"*, Revista de Ingeniería Sísmica, No. 79 25-48 (2008), 2008.
- A. Tena Colunga, A Juárez Ángeles, V.H. Salinas, *"Resistencia y Deformación de Muros de Mampostería Combinada y Confinada Sujetos a Cargas Laterales"*, Revista de Ingeniería Sísmica, No. 76 29-60 (2007), 2007.
- R. Meli, *"Comportamiento Sísmico de Muros de Mampostería"*, Serie No. 352, Instituto de Ingeniería, UNAM, 1975.
- K. J. Willam and E. D. Warnke. *"Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete"*. *Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering*. Vol. 19. ISMES. Bergamo, Italy. p. 174. 1975
- J. Ruiz García, T. Sánchez, S.M. Alcocer, *"Rehabilitación de Muros de Mampostería Confinada Mediante Malla de Alambre y Recubrimiento de Mortero"*, Memorias del Onceavo Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, 808-889.
- M. Astroza, A Schmidt, *"Capacidad de Deformación de Muros de Albañilería Confinada para Distintos Niveles de Desempeño"*, Revista de Ingeniería Sísmica, 70, 59.75
- A. Tena Colunga, *"Análisis de Estructuras Con Métodos Matriciales"*, Editorial LIMUSA, 2009.

- A. Tena Colunga, H.I. Archundia, O.M. González Cuevas, *"Behavior of reinforced concrete haunched beams subjected to static shear load"*, Engineering Structures 30 (2008) 478-492.
- Comité ACI-318, "Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-05) y Comentario (ACI 318SR-05)", American Concrete Institute, 2005.
- A. Juárez Angeles, Tesis de Maestría "Mecanismos de Resistencia y Deformación en Muros de Mampostería Combinada y Confinada"
- A. Grande Vega, Tesis de Maestría *"Mecanismos de resistencia y deformación a cortante de trabes acarteladas de concreto reforzado sujetas ante cargas cíclicas"*, UAM-Azcapotzalco, 2009.
- G. Juárez Luna, *"Apuntes de Curso: Taller de Análisis Estructural III"*, Departamento de Materiales, UAM-Azcapotzalco, 2011.
- S.H. Kosmatka, B. Kerkhoff, W.C. Panarese, J. Tanesi, *"Diseño y Control de Mezclas de Concreto"*, 1ra. Ed., Portland Cement Association PCA, 2004.